



**António José Pereira  
de Figueiredo**

**Caracterização de uma solução de reforço sísmico  
de paredes de adobe**



**António José Pereira  
de Figueiredo**

**Caracterização de uma solução de reforço sísmico  
de paredes de adobe**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizada sob a orientação científica do Doutor Aníbal Guimarães da Costa, Professor Catedrático, e do Doutor Humberto Salazar Amorim Varum, Professor Auxiliar, do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.

Dedico este trabalho à minha Mãe e Namorada pelo incansável apoio.

## **o júri**

Presidente

**Prof. Doutor Paulo Barreto Cachim**

professor associado do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

**Prof. Doutor António José Coelho Dias Arêde**

professor auxiliar da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

**Prof. Doutor Aníbal Guimarães da Costa**

professor catedrático do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

**Prof. Doutor Humberto Salazar Amorim Varum**

professor auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

## agradecimentos

A realização de uma tese de mestrado, embora tenha uma avaliação individual, não deixa de ser uma tarefa de carácter colectivo. O facto de mencionar nomes é uma tarefa algo ingrata e injusta, na impossibilidade de enumerar todas as pessoas que contribuíram para o bom termo desta dissertação. No entanto seria igualmente injusto não referir alguns nomes dos intervenientes mais directos na sua realização.

Ao Professor Doutor Humberto Varum desejo manifestar um especial agradecimento pelo inestimável apoio dado e por todos os ensinamentos que sempre me disponibilizou.

Ao Professor Doutor Aníbal Costa agradeço por todos os ensinamentos e sugestões práticas que me incutiu durante a realização dos trabalhos experimentais.

Ao Professor Doutor António Arêde, aos Mestres Alexandre, Hugo, Dora e Catarina, juntamente com o Srs. Valdemar e André gostaria de agradecer por toda a disponibilidade e apoio dado durante a preparação e realização do ensaio à parede.

À empresa STAP um especial agradecimento pois sem a sua contribuição a reabilitação da parede não teria sido possível, nomeadamente aos Engenheiros Vitor Córias e Miguel Santos.

Ao Sr. Manuel, Sr. António, Sr. Edson e ao Sr. Pedro Paulo, funcionários da empresa STAP manifesto o meu reconhecimento por todas as sugestões práticas e por todo o empenho dedicado na realização das tarefas de reparação e reforço da parede.

À empresa Fregaze agradeço pelo fornecimento da rede utilizada no reforço da parede.

Não posso deixar de reconhecer o apoio que recebi dos meus colegas Vitor Ramisote, David Carlos e Miguel Costa por todo o apoio prestado na elaboração das várias tarefas efectuadas no laboratório.

Aos meus pais e aos meus irmãos gostaria de deixar aqui a minha mais sincera gratidão por todo o apoio directo ou indirecto e pelo carinho dado durante esta etapa.

Não poderia de deixar de referir e agradecer à minha namorada Cátia Lourenço por todo o apoio, pela compreensão, pela amizade, pelos incentivos e por toda a força que me deu para a realização deste trabalho.

Gostaria ainda de agradecer aos meus colegas nomeadamente, José Manuel, Sandro Azevedo e Liliana Lourenço e a todos os outros que não refiro nome, mas que deram um contributo indispensável à realização desta dissertação.

## **palavras-chave**

Construção em terra, adobe, vulnerabilidade sísmica, comportamento cíclico, reforço de paredes, injeção de fissuras, malha sintética.

## **resumo**

Em Portugal Continental, sobretudo na região litoral centro pode encontrar-se um vasto património construído em alvenaria de adobe. Muitos desses edifícios, nomeadamente nos centros históricos, têm um considerável valor arquitectónico, particularmente do estilo “Arte Nova”.

Atendendo a que grande parte deste património se encontra num estado de degradação acentuado, tem-se verificado um crescente interesse na sua recuperação. Como os modelos e as técnicas de reabilitação e reforço recentes, aplicadas a estruturas modernas, mostram-se inadequadas para a reabilitação em alvenaria de adobe, ocorre a necessidade de se desenvolverem novos estudos que venham colmatar a falta de informação existente neste domínio.

Uma vez que estas estruturas apresentam uma elevada vulnerabilidade sísmica, localizadas em zonas de perigosidade não desprezável, o risco sísmico deve ser considerado na análise da segurança estrutural. Foi desenvolvido um modelo de parede com geometria em planta em forma de I à escala real, e ensaiado sob acção de cargas horizontais cíclicas. O objectivo central deste estudo foi obter uma base de conhecimentos que permita desenvolver uma avaliação da segurança e reforço deste tipo de estruturas. Após o ensaio original, os danos foram reparados e procedeu-se ao reforço da parede, sendo novamente submetida a um ensaio cíclico.

Os estudos efectuados permitem desta forma, o desenvolvimento e calibração de novos modelos numéricos, e poderão assegurar a utilização de técnicas de reforço aplicadas em construções de alvenaria de adobe, no património nacional.

**keywords**

Earth construction, adobe, seismic vulnerability, cyclic behaviour, strengthening of walls, injection of cracks, synthetic mesh

**abstract**

In mainland Portugal, especially its littoral coast region is built of adobe masonry. Many of these buildings, namely the ones in the historical centres, have a considerably architectonic value, particularly the ones in the “Art Nouveau” style.

Bearing in mind that a substantial part of that heritage can be found in an advanced state of decay, one can observe a growing concern in its rehabilitation. Once the new models and techniques of rehabilitation and strengthening, applied to modern structures, prove to be inadequate to renovate by using adobe masonry, there is a necessity to develop new studies that can fill in the current lack of information in this field.

Since these structures present a highly seismic vulnerability, located in areas of contemptible danger, the seismic risk should be considered in the analysis of structural safety. A model wall was developed in in the shape of a “I” in real scale and tested under the action of cyclic horizontal loads. The goal of this study was to obtain a base of knowledge which allows a development of a safety assessment and strengthening of these kind of structures.

After the original essay, the damage was repaired and the strengthening of the wall was proceeded, being again submitted to a cyclic test.

In this manner, the studies that were carried out together with the developed and calibration model, will allow the improvement of new numerical models and the usage in our national heritage of reinforcement techniques employed in the adobe masonry model.

## Índice geral

Índice geral .....	i
Índice de figuras .....	iii
Índice de tabelas .....	v
CAPÍTULO 1 - Introdução .....	1
1.1    Preâmbulo .....	1
1.2    Motivação.....	2
1.3    Objectivos .....	2
1.4    Estratégia.....	3
1.5    Estrutura do trabalho .....	3
CAPÍTULO 2 - Enquadramento geral e estudos efectuados em construções de adobe.....	5
2.1    O adobe no Mundo.....	5
2.2    O adobe em Aveiro .....	6
2.3    Ensaaios de caracterização do adobe .....	8
2.4    Ensaaios em elementos estruturais .....	11
2.5    Técnicas de reforço estudadas experimentalmente.....	16
CAPÍTULO 3 - Descrição da intervenção efectuada na parede de alvenaria de adobe .....	27
3.1    Construção da parede de alvenaria de adobe .....	27
3.2    Instrumentação usada na realização dos ensaios.....	29
3.3    Evolução dos ensaios e danos provocados na parede .....	30
3.4    Resultados obtidos dos ensaios .....	31
3.4.1    Ensaaios cíclicos.....	31
3.4.2    Ensaaios dinâmicos .....	32
3.4.3    Ensaaios de flexão e compressão aos provetes de argamassa de construção .....	33
CAPÍTULO 4 - Estudo dos materiais para a reabilitação da parede de alvenaria de adobe ....	35
4.1    Levantamento dos materiais existentes no mercado .....	35
4.2    Ensaaios aos materiais a usar na reabilitação da parede.....	41
4.2.1    Ensaaios de flexão aos blocos de adobe .....	42
4.2.2    Ensaaios de tracção à rede Cintoflex usada na reabilitação da parede.....	46
CAPÍTULO 5 - Caracterização do comportamento estrutural da parede de alvenaria de adobe reforçada .....	49
5.1    Descrição da reabilitação da parede de alvenaria de adobe.....	49
5.1.1    Reparação dos danos.....	49



5.1.2	Reforço da parede.....	53
5.1.3	Análise de custos.....	58
5.2	Preparação dos ensaios cíclicos e dinâmicos.....	59
5.3	Ensaio cíclicos .....	62
5.4	Ensaio dinâmico .....	71
5.5	Ensaio de flexão e compressão da argamassa de construção.....	73
CAPÍTULO 6 – Conclusões e desenvolvimentos futuros.....		75
6.1	Conclusões gerais .....	75
6.2	Possíveis linhas de desenvolvimento futuro.....	76
Bibliografia.....		79

## Índice de figuras

Figura 1 – Distribuição geográfica das principais técnicas tradicionais de construção em terra (Jorge <i>et al.</i> , 2005).....	6
Figura 2 – Ensaios mecânicos dos provetes (Varum <i>et al.</i> , 2005).....	9
Figura 3 – Curvas de comportamento dos provetes ensaiados: tensão <i>versus</i> deformação (Varum <i>et al.</i> , 2005).....	9
Figura 4 – Esquema e resultados do ensaio (Varum <i>et al.</i> , 2006). ....	12
Figura 5 – Esquema geral da parede (Blondet <i>et al.</i> , 2004). ....	13
Figura 6 – Gráfico carga <i>versus</i> deslocamento (Blondet <i>et al.</i> , 2004).....	14
Figura 7 – Fabricação dos muros (Zavala e Igarashi, 2006).....	14
Figura 8 – Resultados dos muros de adobe sem reforço (Zavala e Igarashi, 2006). ....	16
Figura 9 – Configuração e dimensões da parede (adaptado de Dowling <i>et al.</i> , 2005). ....	17
Figura 10 – Estado da parede 3A após o ensaio (Dowling <i>et al.</i> , 2005). ....	19
Figura 11 – Estado da parede 3B após o ensaio (Dowling <i>et al.</i> , 2005).....	19
Figura 12 – Estado da parede 3E após o ensaio (Dowling <i>et al.</i> , 2005).....	20
Figura 13 – Estado da parede 3G após o ensaio (Dowling <i>et al.</i> , 2005). ....	20
Figura 14 – Estado da parede 3I após o ensaio (Dowling <i>et al.</i> , 2005). ....	21
Figura 15 – Ensaio do muro com reforço exterior de geomalha (Blondet <i>et al.</i> , 2004). ....	22
Figura 16 – Modelo reforçado com malha exterior de plástico (Torrealva e Acero, 2005). ....	22
Figura 17 – Vivendas ensaiadas (Yamin <i>et al.</i> , 2005).....	24
Figura 18 – Primeiras fiadas da parede (Pereira, 2008).....	28
Figura 19 – Fases finais da construção da parede de adobe (Pereira, 2008). ....	28
Figura 20 – Equipamentos usados nos ensaios.....	30
Figura 21 – Evolução dos danos (face Sul) (Pereira, 2008). ....	30
Figura 22 – Danos finais (face Norte) (Pereira, 2008). ....	31
Figura 23 – Força <i>versus</i> deslocamento ao nível da aplicação da força (adaptado de Pereira, 2008). ....	31
Figura 24 – Evolução das frequências ao longo do ensaio (Pereira, 2008).....	32
Figura 25 – Esquema do ensaio à flexão dos blocos de adobe.....	42
Figura 26 – Ensaios e selagem dos blocos de adobe. ....	43
Figura 27 – Percentagem adquirida pelos blocos após selagem.....	45
Figura 28 – Esquema geral do ensaio. ....	46
Figura 29 – Curva tensão <i>versus</i> deformação.....	47

Figura 30 – Antes e após o ensaio dos provetes.....	48
Figura 31 – Sequências de tarefas realizadas na reparação da parede. ....	52
Figura 32 – Esquema do reforço da parede de alvenaria de adobe.....	53
Figura 33 – Sequencia de operações desenvolvidas no reforço da parede.....	57
Figura 34 – Curva granulométrica da areia usada na argamassa de reboco.....	58
Figura 35 – Análise dos custos de reparação e reforço. ....	59
Figura 36 – Transdutores de deslocamentos verticais.....	60
Figura 37 – Transdutores de deslocamentos horizontais. ....	61
Figura 38 – Transdutores de deslocamentos oblíquos na face norte.....	61
Figura 39 – Evolução da força ao longo do ensaio. ....	63
Figura 40 – Evolução do deslocamento no ponto de aplicação da força ao longo do ensaio. .	63
Figura 41 – Evolução da fissuração nas faces Norte e Sul.....	65
Figura 42 – Evolução da fissuração nas faces Oeste e Este. ....	66
Figura 43 – Danos finais visíveis nas faces Norte e Sul. ....	67
Figura 44 – Força <i>versus</i> deslocamento ao nível do ponto de aplicação da força (LV 41). ....	68
Figura 45 – Evolução da energia total ao longo do ensaio.....	69
Figura 46 – Força <i>versus</i> deslocamento no topo da parede (LF 15) com e sem reforço.....	70
Figura 47 – Evolução das frequências próprias (Hz) da parede.....	71
Figura 48 – Evolução da 1ª frequência da parede reforçada <i>versus</i> parede original com força vertical.....	72

## Índice de tabelas

Tabela 1 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão (Useche, 2006).....	10
Tabela 2 – Resultados dos ensaios de adobe (Figueiredo e Casbur, 2006).....	11
Tabela 3 – Dimensões dos muros (adaptado de Zavala e Igarashi, 2006).....	15
Tabela 4 – Ensaio de rigidez dos muros (adaptado de Zavala e Igarashi, 2006).....	15
Tabela 5 – Frequências naturais das paredes (adaptado de Dowling <i>et al.</i> , 2005). ....	18
Tabela 6 – Comparação e resultados dos cinco modelos ensaiados (Torrealva e Acero, 2006). .....	25
Tabela 7 – Tensão resistente da argamassa de construção da parede.....	33
Tabela 8 – Redes sintéticas.....	36
Tabela 9 – Redes metálicas.....	38
Tabela 10 – Cantoneiras em PVC.....	40
Tabela 11 – Buchas plásticas.....	41
Tabela 12 – Fios de nylon.....	41
Tabela 13 – Tensão de rotura dos blocos de adobe. ....	43
Tabela 14 – Tensão de rotura dos blocos de adobe selados com cal.....	44
Tabela 15 – Resultados tensão deformação da rede Cintoflex.....	47
Tabela 16 – Ciclos de deslocamentos impostos à parede. ....	62
Tabela 17 – Tensão resistente dos provetes de selagem das fissuras. ....	73
Tabela 18 – Tensão resistente dos provetes de argamassa de reboco da parede. ....	74

## CAPÍTULO 1 - Introdução

### 1.1 Preâmbulo

A construção em terra é das técnicas construtivas utilizadas pelas sociedades humanas mais antigas no mundo. As propriedades únicas deste material e a sua disponibilidade gratuita permitem essa grande disseminação. O grande desenvolvimento económico e tecnológico, com a introdução de novos materiais e técnicas construtivas, levou ao esquecimento das técnicas usadas tradicionalmente. Actualmente, apesar da estagnação dessas técnicas como construção, ainda existem muitos edifícios construídos em terra que atestam a sua longevidade até aos dias de hoje. Torna-se, portanto, uma necessidade corrente de se realizarem novos estudos que permitam o desenvolvimento de técnicas de reabilitação adequadas a estas estruturas.

Todas as estruturas expostas ao vento e sujeitas ao sismo, nomeadamente construções em terra, devem ter um dimensionamento cuidado, abordando sempre todas as situações que possam levar à sua degradação prévia ou até mesmo ao colapso. Verifica-se, assim, a necessidade de se elaborarem novos estudos que permitam adquirir um conhecimento mais aprofundado dos materiais e das suas características mecânicas e físicas, com o intuito de obter-se uma melhor compreensão do seu funcionamento após aplicação.

É também necessário elaborar uma série de estudos e ensaios experimentais para a criação e calibração de modelos numéricos que simulem o real comportamento das estruturas, nomeadamente em estruturas de alvenaria de adobe que são muito sensíveis ao sismo. Este tipo de construções apresenta uma resposta muito deficiente às acções horizontais, devido à

sua fraca resistência à tracção e ao seu comportamento frágil (Brito e Gomes, 2005). A sua vulnerabilidade ao sismo muitas vezes ocorre devido a técnicas de construção pouco adequadas.

## **1.2 Motivação**

As construções em adobe ao longo dos tempos têm vindo a estagnar com o aparecimento de novos materiais e técnicas construtivas. A maioria do património histórico português, designadamente no distrito de Aveiro, é em adobe (Veiga, 1992). De forma a preservar a história das construções, ou de uma cidade, é importantíssimo um conhecimento mais aprofundado dessas construções e dos materiais utilizados, para que a sua reabilitação e preservação seja efectuada mantendo-se os mesmos materiais e opções arquitectónicas existentes.

Devido à ausência de uma norma construtiva portuguesa em adobe, a construção de edifícios de terra tem sido projectada e realizada sem o enquadramento de qualquer código ou documento normativo. O desenvolvimento deste trabalho tem como motivação aprofundar o conhecimento dessas estruturas, para que em conjunto com outros trabalhos de investigação, se reúnam técnicas e conhecimentos mais aprofundados que contribuam para a elaboração futura de uma norma.

## **1.3 Objectivos**

Com esta dissertação pretende-se contribuir para uma melhor caracterização do comportamento estrutural, das construções existentes em alvenaria de adobe. Deseja-se ainda aprofundar o nível de informação existente relativa aos materiais propícios de serem usados no reforço destas alvenarias, através de ensaios de resistência mecânica. Com a aplicação de uma técnica de reparação e reforço numa parede, pretende-se demonstrar que a reabilitação para alvenarias de adobe é uma solução sustentável, resistente e bastante eficaz na presença de solicitações horizontais cíclicas, como as induzidas por sismos.

A informação obtida irá proporcionar uma melhor interpretação das patologias estruturais mais comuns, a calibração de modelos numéricos e o desenvolvimento de outras soluções de reforço.

## **1.4 Estratégia**

Para o desenvolvimento deste trabalho, construiu-se em laboratório uma parede de geometria em planta em I à escala real, em alvenaria de adobe. Os adobes utilizados para a realização desta parede foram recolhidos em obras existentes na zona de Aveiro, de forma a garantir que o material usado na sua realização fosse o mesmo que era usado nas construções. A argamassa para a construção da parede foi produzida em laboratório, procurando-se manter as mesmas características da existente nas obras de onde provieram os blocos de adobe.

Posteriormente esta parede foi alvo de várias campanhas de ensaios, nomeadamente dinâmicos e cíclicos. Após estes ensaios, os danos provocados foram reparados e procedeu-se ao reforço da parede, sendo posteriormente submetida a novos ensaios dinâmicos e cíclicos.

Numa fase final do trabalho compararam-se os resultados obtidos dos ensaios da parede no seu estado original e após reforço, para se obter um maior nível de conhecimentos neste domínio, de forma a resolver e evitar eventuais problemas nas construções existentes.

## **1.5 Estrutura do trabalho**

A estrutura desta dissertação encontra-se dividida em 6 capítulos e organizada da seguinte forma:

- No presente capítulo, procura-se referir o tema desenvolvido e enquadrá-lo no contexto geral da engenharia civil. Pretende-se, ainda, definir a estratégia adoptada e explicitar os objectivos que se desejam alcançar com a realização deste trabalho.
- No Capítulo 2, efectua-se um enquadramento geral sobre as construções em terra: na primeira parte, apresenta-se a evolução e o uso do adobe como material de construção, no mundo e no distrito de Aveiro; a segunda parte é dedicada à pesquisa bibliográfica

sobre os trabalhos que se têm desenvolvido à volta da caracterização estrutural de alvenaria de adobe e técnicas de reforço já estudadas experimentalmente.

- O Capítulo 3 é dedicado a uma descrição sucinta do estudo efectuado a uma parede de geometria em planta em I de alvenaria de adobe, à escala real. Esta parede foi construída no laboratório e, em seguida, foi alvo de uma campanha de ensaios experimentais no plano, nomeadamente ensaios dinâmicos e cíclicos. Apresenta-se também neste capítulo, a instrumentação utilizada na realização dos ensaios, os danos sofridos pela parede com a correspondente evolução dos ensaios efectuados e os resultados obtidos.
- No Capítulo 4, faz-se referência a um estudo e levantamento dos materiais existentes no mercado, possíveis de utilização na reparação e no reforço da parede. Este estudo teve como objectivo adquirir uma maior percepção sobre o comportamento dos materiais, através da recolha das suas informações técnicas. Como complemento a essas informações, realizou-se em laboratório uma série de ensaios experimentais, mais especificamente ensaios de flexão aos blocos de alvenaria de adobe para testar a eficiência dos ligantes a impregnar na selagem das fissuras e ensaios de tracção para aprofundar os conhecimentos sobre o desempenho da rede usada no reforço da parede.
- O Capítulo 5 incide sobre a reparação e o reforço efectuado na parede. Apresenta-se, neste capítulo, uma descrição pormenorizada das tarefas e técnicas utilizadas na reparação e no reforço. É, ainda, efectuada uma breve análise aos custos associados a estas intervenções, com o objectivo de demonstrar que a reabilitação para estas estruturas passa por uma solução económica e sustentável. Neste âmbito, realizou-se uma panóplia de ensaios experimentais cíclicos e dinâmicos como os descritos no Capítulo 4, no intuito de estudar a eficiência do reforço. Formulou-se uma conclusão tendo por base a análise dos resultados obtidos, assim como uma comparação entre ambos os ensaios.
- No Capítulo 6, enunciam-se as principais conclusões do trabalho desenvolvido, bem como alguns casos que podem ser objecto de futuros desenvolvimentos, no sentido de se alargar e aprofundar o estudo desenvolvido.



## **CAPÍTULO 2 - Enquadramento geral e estudos efectuados em construções de adobe**

Este capítulo é essencialmente dedicado à recolha de bibliografia dos estudos já desenvolvidos sobre o tema desta dissertação. Desta forma pretende-se adquirir uma maior sensibilidade para os problemas existentes ao nível das construções em alvenaria de adobe.

### **2.1 O adobe no Mundo**

Não se conhece uma idade correcta para o primeiro edifício da história mas, desde as primeiras civilizações que existe registo de grandes construções. Sabe-se que na Mesopotâmia da época de 3500 a 1600 a.C., devido à escassez de pedras, as civilizações foram construídas em tijolos de terra de argila secos ao sol. O maior dos prédios deste período, o Zigurate de Ur, tinha um pavimento superior com mais de 30 metros de altura (Newhouse, 1992).

Actualmente, a utilização de terra como material de construção tem vindo gradualmente a desaparecer. Apesar dos novos materiais e técnicas construtivas que se têm vindo a implantar nas construções, ainda existe uma fracção considerável da população mundial a habitar em edifícios de alvenaria de adobe. Estima-se que cerca de 30% da população mundial continua a viver neste tipo de construções (Houben, 1994).

Grande parte destes edifícios localiza-se em países do terceiro mundo. No entanto, países como Portugal, Espanha, França, Brasil, entre outros, apresentam uma percentagem significativa de edifícios em alvenaria de terra, que sobreviveram ao longo dos tempos, e continuam a oferecer aos seus habitantes boas condições de habitabilidade (Houben, 1994).

Em Portugal, ainda é possível encontrar uma grande fracção de território edificado em alvenaria de terra. As principais técnicas tradicionais usadas são a taipa, o adobe e o tabique, distribuídos geograficamente como mostra a Figura 1 (Veiga, 1992; Jorge *et al.*, 2005).

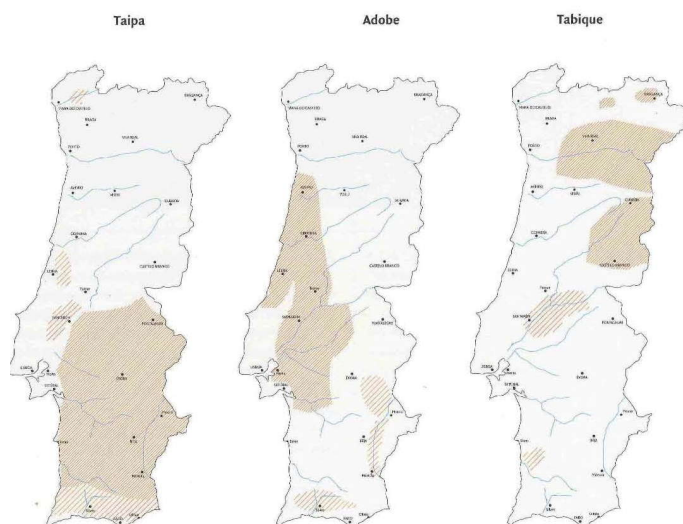


Figura 1 – Distribuição geográfica das principais técnicas tradicionais de construção em terra (Jorge *et al.*, 2005).

## 2.2 O adobe em Aveiro

Da Figura 1 observa-se que a maioria da edificação em alvenaria de adobe encontra-se na zona centro litoral, nomeadamente confinada ao distrito de Aveiro. Esta edificação apareceu no final do séc. XIX e atingiu o seu auge na primeira metade do séc. XX, tendo vindo gradualmente a desaparecer nos anos sessenta até ao seu completo desuso como técnica construtiva. Actualmente, segundo dados do município de Aveiro, cerca de 20 a 25% da edificação existente na cidade é em adobe, que ao alargar-se esta fracção a toda a região, aumenta para 35 ou até mesmo para 40%. Presentemente, as construções em adobe são, ainda, vários exemplos de património histórico, sobretudo ligados à “Arte Nova”, ao movimento artístico e arquitectónico dominante na época (Varum *et al.*, 2006).

As construções em Aveiro não se limitaram apenas a pequenas e modestas casas, a arrecadações rurais, a armazéns, a muros e poços. Ainda hoje, pode-se presenciar a redundância de obras de elevada envergadura e valor histórico tais como, igrejas, casas de espectáculos e grandes mansões.

Em geral, naquela época, os blocos de adobe eram produzidos com terra arenosa húmida que, depois de amassada e metida em formas, era seca ao sol. Era técnica usual, na altura, a inclusão de cal e, por vezes, de palha para o melhoramento das características mecânicas dos blocos de adobe (Varum *et al.*, 2005). A argamassa usada na ligação dos blocos de adobe geralmente era efectuada, usando areia e terra como inertes e, como ligante, cal. Em algumas obras menos importantes como a construção de muros, era usada uma argamassa feita essencialmente à base de terra e palha (Varum *et al.*, 2005).

Devido ao desconhecimento de técnicas de reabilitação para este tipo de construções, grande parte destes edifícios destinados à habitação e alguns deles a serviços encontra-se num estado de degradação considerável. No entanto, a maioria continua a satisfazer as funções para as quais foram projectados e assim vão atestando a longevidade e duração do adobe como material de construção (Varum *et al.*, 2005).

A construção com terra crua é uma solução ecologicamente interessante. O material utilizado é reciclável, permitindo uma utilização mais sustentável e a preservação de recursos naturais. A construção utiliza apenas maquinaria simples e força humana e devido às suas excelentes características térmicas, reduz os consumos de energia eléctrica. Outra vantagem deste material é ser incombustível, apresentando assim, um bom comportamento face ao fogo. As principais desvantagens destas construções prendem-se a uma deficiente resistência mecânica, a pouca resistência a esforços horizontais (sismos) e a um mau comportamento na presença de humidade.

Têm-se observado vários estudos realizados por Arêde *et al.*, (2007), Varum *et al.*, (2006), Varum *et al.*, (2005) para colmatar a falta de informação existente, nomeadamente nas propriedades do adobe tais como, a sua composição, resistência e rigidez. Para elementos estruturais de alvenaria de adobe o estudo incide na sua dissipação de energia, rigidez, mecanismos de colapso, ductilidade e capacidade resistente.

### 2.3 Ensaios de caracterização do adobe

No âmbito da realização desta dissertação, levaram-se a cabo numerosas pesquisas sobre vários trabalhos de caracterização do adobe, que se têm vindo a desenvolver na região de Aveiro e no Mundo. Através destas investigações foi-se aprofundando o conhecimento sobre as suas características.

A Universidade de Aveiro tem vindo a desenvolver uma série de estudos, para colmatar a escassez de informação do comportamento e das características mecânicas do adobe existente na região. A estratégia adoptada, foi retirar das construções existentes (casas e muros) na região de Aveiro uma selecção de amostras representativas das suas tipologias, devido à enorme heterogeneidade do adobe existente. Das amostras de adobe recolhidas, foram retirados carotes cilíndricos com diâmetros de 70 e 90mm respectivamente (Varum *et al.*, 2006).

Os provetes foram submetidos a ensaios de compressão simples, a fim de determinar a resistência mecânica dos elementos de adobe. Os valores obtidos de resistência à compressão variam entre 0.99 e 2.15MPa. Os valores de resistência mais baixos, como era de prever, foram obtidos para os carotes retirados dos muros, dado que a construção de um muro não é tão importante como a de uma casa. Os valores obtidos para o módulo de elasticidade variam entre 161 e 448MPa (Varum *et al.*, 2006).

Num outro estudo efectuado pela Universidade de Aveiro, realizaram-se ensaios de caracterização do adobe, designadamente levantamentos dimensionais, estudos da composição dos diferentes adobes da região e do seu comportamento mecânico. Para efectuar os ensaios, usaram-se carotes cilíndricos com 90mm de diâmetro e uma altura de quatro vezes o raio, retirados dos blocos de adobe (Varum *et al.*, 2005).

Os ensaios para a obtenção da granulometria do adobe foram obtidos por peneiração seca dos constituintes das amostras. Do traçado das curvas granulométricas das várias amostras, concluiu-se que a maioria pode ser classificada como areias grossas. Apenas os agregados de uma casa foram classificados como areias médias (Varum *et al.*, 2005).

Os ensaios para a caracterização mecânica dos blocos de adobe foram efectuados com recurso a uma prensa mecânica, submetendo-os à compressão simples e diametral (Figura 2).



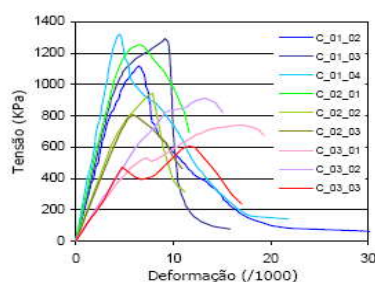
a) compressão simples



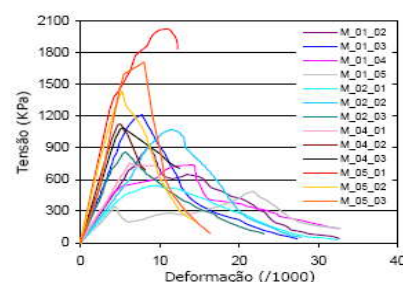
b) compressão diametral

Figura 2 – Ensaio mecânicos dos provetes (Varum *et al.*, 2005).

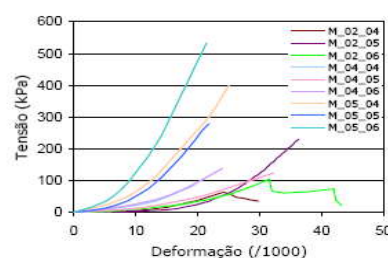
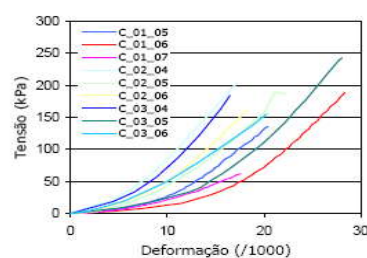
Os resultados obtidos nos ensaios de compressão simples (Figura 3) mostram valores significativos da resistência à compressão das amostras ensaiadas (0.5-2.0MPa), sendo que, para a resistência à tracção, igualmente expressivos. Os resultados obtidos correspondem a valores de aproximadamente 20% da respectiva resistência à compressão (Varum *et al.*, 2005).



a) compressão simples: provetes de casas



b) compressão simples: provetes de muros

Figura 3 – Curvas de comportamento dos provetes ensaiados: tensão *versus* deformação (Varum *et al.*, 2005).

Confrontando os resultados da análise granulométrica com os obtidos dos ensaios de compressão simples, concluiu-se que houve uma clara tendência para que as amostras com

maiores fracções de partículas de menores dimensões conduzissem a valores de resistências à compressão e tracção superiores (Varum *et al.*, 2005).

A Universidade Nacional Experimental de Táchira, na Venezuela, efectuou um estudo com o intuito de otimizar as características mecânicas e de durabilidade útil de um edifício. Para tal, foram construídos blocos de adobe modificados com um estabilizante, de forma a encontrar uma mistura que apresentasse melhores características mecânicas. Os adobes fabricados tinham  $29 \times 14 \times 10.5 \text{ cm}^3$  de dimensões e o estabilizante usado nas misturas foi cimento Portland do tipo I (Useche, 2006).

A Tabela 1 mostra o delineamento das misturas, proporções e resistências à compressão obtidas.

Tabela 1 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão (Useche, 2006).

Delineamento das misturas	Proporções	Resistência à compressão (kgf/cm <sup>2</sup> )
Terra; areia; cimento	9 : 1-2/1 : 1	18.0
Material reciclado; areia; cimento	9 : 4 : 1-1/2	18.5
Terra; areia; cimento	9 : 2 : 1	26.0
Terra; areia; cimento	8 : 1 : 2/3	31.0

Entre vários factores observados, verificou-se que a humidade do adobe era decisiva para o seu comportamento e duração. Concluiu-se ainda que a mistura que adquiriu uma maior resistência à compressão, foi aquela que continha terra, areia e cimento nas proporções 8:1:2/3 (Useche, 2006).

No Brasil, para ensinar à população economicamente carente a construir a sua própria casa, foi efectuada uma série de estudos para encontrar uma mistura no fabrico de blocos de adobe que apresentasse melhores características, tendo em conta a ecologia e a facilidade na aquisição dos materiais.

O ensaio teve como princípio seleccionar apenas o solo que se encontrava a uma profundidade mínima de 0.40m, para diminuir a quantidade de matéria orgânica. Dentro do

solo encontrado, procurou-se utilizar sempre aquele que, na sua composição, tivesse 70% de areia e 30% de argila. Foi também usado um solo que continha fibras vegetais para melhorar a sua resistência mecânica (Figueiredo e Casbur, 2006).

Tabela 2 – Resultados dos ensaios de adobe (Figueiredo e Casbur, 2006).

Materiais	Proporção em volume traço	Dimensões (cm)			Resistência à compressão (MPa)
		Largura	Altura	Comprimento	
Terra	1	200	70	320	1.1
Terra: areia	5:1	220	70	330	2.0
Terra: cimento	15:1	195	80	310	2.3
Terra: areia: esterco	15:5:1	220	70	320	3.3

Dos resultados obtidos (Tabela 2), concluiu -se que o uso de fibras vegetais como estabilizante, permite ao adobe adquirir elevadas resistências à compressão a baixos custos.

## 2.4 Ensaios em elementos estruturais

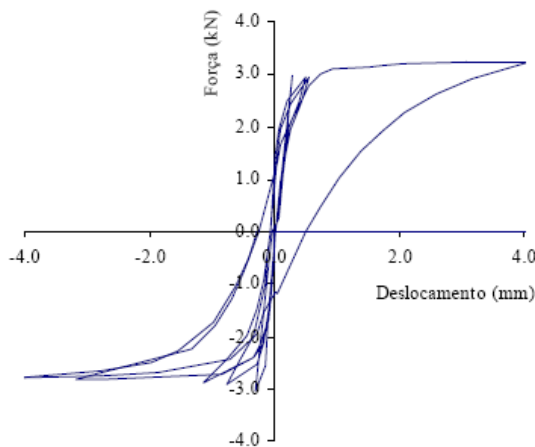
O Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro, em 2006, efectuou alguns ensaios sobre paredes, em laboratório e *in-situ*, sob solicitações verticais permanentes combinadas com solicitações horizontais cíclicas, como as induzidas por sismos no sentido de caracterizar a rigidez, a capacidade resistente, a capacidade de dissipação de energia e o mecanismo de colapso de alvenarias de adobe existentes nas construções da região.

A parede construída em laboratório (Figura 4) com o material recolhido das construções tradicionais, tinha uma altura de 1.08m, uma largura de 1.02m e uma espessura de 0.185m. O valor de resistência à compressão do adobe usado foi de 1.10MPa e de 147.3MPa de módulo de elasticidade. Para as juntas, usou-se uma argamassa com resistência à compressão de 1.42MPa e módulo de elasticidade de 112.8MPa (Varum *et al.*, 2006).

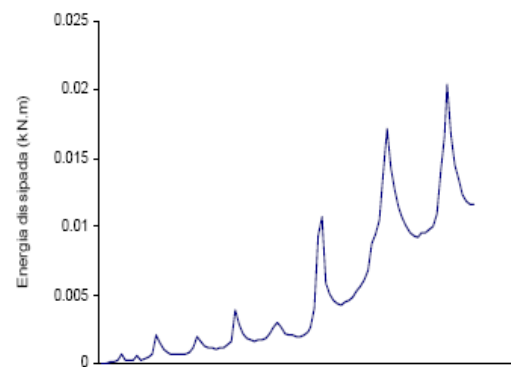
Antes da realização do ensaio cíclico, colocou-se uma carga vertical de 2.86kN no topo da parede. Foram impostas forças horizontais no plano da parede, em ciclos de amplitude crescente até ao seu colapso. A força horizontal máxima aplicada foi de 3.20kN (Varum *et al.*, 2006).



a) Esquema de ensaio



b) Gráfico força *versus* deslocamento



c) Gráfico da energia dissipada

Figura 4 – Esquema e resultados do ensaio (Varum *et al.*, 2006).

Deste ensaio concluiu-se que o modo de rotura verificado foi o característico para este tipo de paredes de alvenaria e para os níveis de tensão vertical em causa (Varum *et al.*, 2006).

Dos ensaios realizados *in-situ* para os efeitos dinâmicos obteve-se uma frequência de 2.20Hz na direcção transversal da parede, e um módulo de elasticidade médio na ordem dos 101.2MPa. No caso dos ensaios cíclicos no plano, o valor da força horizontal máxima aplicada na parede foi de 10.7kN. Não se elevou a carga a um nível superior, até à rotura, para



que fosse possível realizar-se outro ensaio cíclico, fora do plano da parede. Neste segundo ensaio, o valor máximo da força aplicada foi de 0.69kN e verificou-se para um deslocamento de 16mm que conduziu ao colapso da parede (Varum *et al.*, 2006).

O Peru é um país em que uma percentagem considerável da população vive em construções de alvenaria de adobe. No sentido de aprofundar os conhecimentos sobre o comportamento sísmico nestas alvenarias, a Universidade Católica do Peru tem vindo a desenvolver alguns estudos. Para tal foi construída uma parede de geometria em planta em I (Figura 5) com um comprimento de 3.06m, 1.93m de altura e 0.30m de espessura, em que os banzos têm uma largura de 2.48m. A parede no centro da aba, continha uma janela de  $30 \times 90 \text{ cm}^2$ . Foram efectuados ensaios cíclicos na direcção do plano da parede, usando um actuador de potência máxima de 500kN. Os movimentos sofridos pela parede durante o ensaio foram registados por dezassete sensores electrónicos que se encontravam colocados em vários pontos estratégicos na parede. (Blondet *et al.*, 2004).



Figura 5 – Esquema geral da parede (Blondet *et al.*, 2004).

A parede mostrou um comportamento global praticamente elástico até um deslocamento imposto de 0.5mm. Previu-se então a dureza elástica da parede em 41kN/mm (Figura 6). Continuou-se a aumentar as forças impostas pelo actuador, obtendo-se uma tensão máxima antes de a parede entrar em colapso de 41kPa (Blondet *et al.*, 2004).

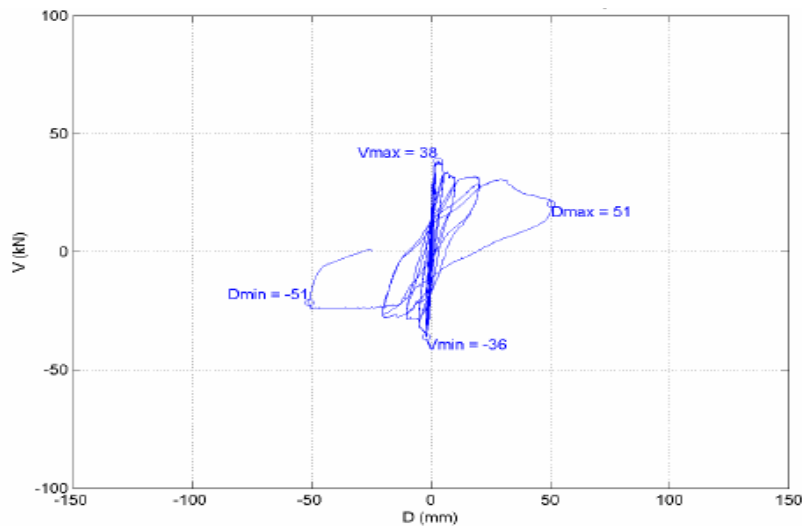


Figura 6 – Gráfico carga *versus* deslocamento (Blondet *et al.*, 2004).

Posteriormente esta parede foi alvo de sucessivos reforços e novos ensaios, de forma a caracterizar o comportamento ao sismo de alguns produtos e técnicas usadas no reforço. Esses reforços encontram-se descritos na secção 2.5.

Com base no sismo de Ático de 2001, que ocorreu em São Francisco, no Peru, a Universidade Nacional de Engenharia CISMID aprofundou o estudo existente em edifícios construídos em alvenaria de adobe, dado que estas estruturas apresentam uma elevada fragilidade ao sismo e uma baixa resistência mecânica dos seus blocos.

A estratégia adoptada foi a construção de vários muros em alvenaria de adobe (Figura 7), em que a argamassa usada entre fiadas e nas juntas, tinham a composição verificada nos blocos (Zavala e Igarashi, 2006).



Figura 7 – Fabricação dos muros (Zavala e Igarashi, 2006)

Os muros apresentavam algumas variações nas suas dimensões (Tabela 3) devido às imensas irregularidades dos blocos de adobe (Zavala e Igarashi, 2006).

Tabela 3 – Dimensões dos muros (adaptado de Zavala e Igarashi, 2006).

Muro	Espessura (m)	Comprimento (m)	Altura (m)
MASR 01	0.203	2.458	2.302
MASR 02	0.203	2.452	2.312
MASR 03	0.202	2.446	2.303
MASR 04	0.203	2.461	2.313

Para a aplicação da carga, foi utilizado um actuador de 25 toneladas, trabalhando sobre um intervalo de 5 toneladas, a uma altura de 1.18m desde a base do modelo. O controlo foi efectuado através de um computador conectado a cinco sensores instalados na parede, registando os seus deslocamentos sofridos (Zavala e Igarashi, 2006).

Os resultados obtidos para a força *versus* deslocamento em regime elástico da parede encontram-se expressos na Tabela 4.

Tabela 4 – Ensaio de rigidez dos muros (adaptado de Zavala e Igarashi, 2006).

Muros	Rigidez (t/mm)
MASR 01	Não foi ensaiado
MASR 02	1.63
MASR 03	1.77
MASR 04	1.14
Médio	1.51

Como se observa pela Figura 8, o deslocamento máximo foi alcançado na parede (MASR 04), apresentando um valor de 8.49mm para uma carga de 1.18 toneladas (Zavala e Igarashi, 2006).

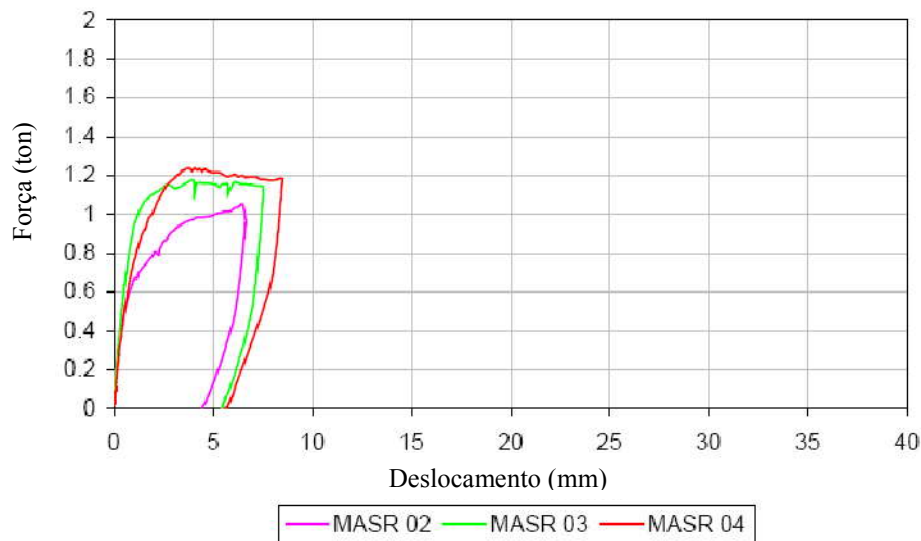


Figura 8 – Resultados dos muros de adobe sem reforço (Zavala e Igarashi, 2006).

Diversos estudos têm sido efectuados por todo o mundo. Tolles, desde 1989 até 2000, contribuiu muito para o conhecimento de estruturas em adobe, ensaiando moradias a escalas reduzidas em mesas sísmicas (Tolles *et al.*, 1989; Tolles *et al.*, 1993; Tolles *et al.*, 2000).

## 2.5 Técnicas de reforço estudadas experimentalmente

Com o intuito de preservar o património histórico ou de evitar uma possível catástrofe em caso de sismo, têm-se elaborado várias técnicas de reforço aplicadas em alvenarias de adobe, com o objectivo de se obter uma base de conhecimentos mais aprofundada nessas áreas.

As técnicas geralmente mais utilizadas que proporcionam melhores resultados face à presença de um sismo são:

- Reforço horizontal e vertical com canas de bambu, madeira ou similares;
- Encamisamento das paredes com redes metálicas ou sintéticas e reboco à base de argamassas de cal;
- Ligação dos panos de parede opostos com tirantes de madeira;
- Travamento de panos de parede concorrentes.

Devido aos danos devastadores que os sismos têm nas construções de alvenaria de adobe, a Universidade de Tecnologia de Sidney na Austrália construiu varias paredes com geometria em planta em U para estudar novas técnicas construtivas e de reforço.

A parede em U foi construída à escala de 1:2, como mostra a Figura 9. Esta foi constituída por blocos de adobe de dimensões  $150 \times 150 \times 50 \text{ mm}^3$  e por uma argamassa de assentamento de 12 a 13mm de espessura com a mesma composição dos blocos, assente numa base de betão armado. Aplicou-se uma força de equilíbrio descendente nos topos das paredes “da asa” para simular a restrição fornecida por uma parede contínua, e para impedi-la de se emborcar da unidade completa (Dowling *et al.*, 2005)

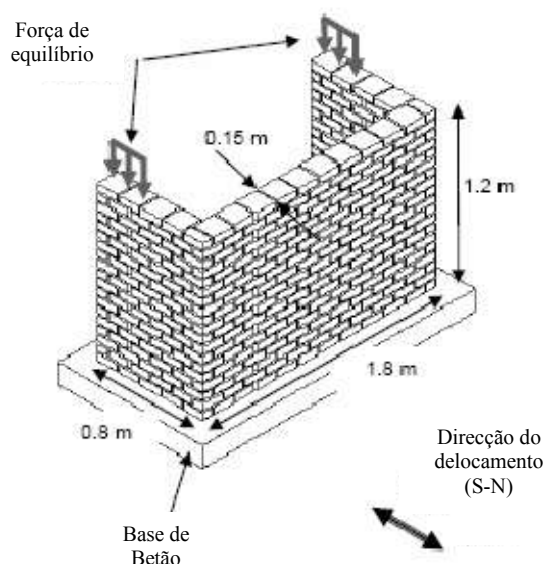


Figura 9 – Configuração e dimensões da parede (adaptado de Dowling *et al.*, 2005).

A leitura dos dados foi efectuada através de acelerómetros e sensores de deslocamentos LVDT's, que registaram os movimentos relativos e a resposta dinâmica da estrutura. A simulação dinâmica foi executada numa mesa de sacudidela uniaxial localizada na Universidade de Tecnologia em Sidney (Dowling *et al.*, 2005).

Dowling *et al.*, (2005) no seu estudo realizado aplicou algumas técnicas de reforço nas paredes em U, com o objectivo de encontrar soluções mais eficientes e económicas, utilizando

os materiais existentes na região para o desenvolvimento dos respectivos reforços. Algumas das técnicas e materiais usados foram os seguintes:

- Colocação de pilares nos vértices concorrentes (parede 3B);
- Aplicação de bambu externo na face interior e exterior da parede, de uma viga de coroamento e colocação de uma malha de galinheiro interna a cada três fiadas (parede 3E);
- Aplicação de bambu interno, de uma viga de coroamento em madeira e de uma malha de galinheiro interna a cada três fiadas (parede 3G);
- Aplicação de bambu vertical na face interna da parede e de bambu horizontal na face externa, de uma viga de coroamento em madeira e de uma malha de galinheiro a cada três fiadas (parede 3I).

Dowling *et al.*, (2005) para além da série de paredes reforçadas, ensaiou a parede 3A no seu estado original (sem reforço), para caracterizar o comportamento estrutural das construções existentes, e ser alvo de comparações para os reforços estudados.

Antes da realização dos ensaios na mesa sísmica, efectuaram-se algumas leituras às frequências naturais das paredes. A frequência foi obtida através de uma aceleração imposta por uma pancada de um martelo, cujos valores encontram-se expressos na Tabela 5 (Dowling *et al.*, 2005).

Tabela 5 – Frequências naturais das paredes (adaptado de Dowling *et al.*, 2005).

Paredes	Primeira frequência natural das paredes (Hz)
3A	29.6
3B	34.1
3E	30.8
3G	24.8
3I	31.6

A parede 3A exibiu uma rotura típica para este tipo de alvenarias (Figura 10), sendo indicativa dos possíveis danos sofridos pelas casas construídas com estes materiais, perante a

presença de um sismo. Os principais problemas identificados foram: rotura na ligação da interface argamassa-tijolo; rotura dos cantos dos blocos de adobe; fraca ligação dos panos concorrentes da parede (Dowling *et al.*, 2005).



Figura 10 – Estado da parede 3A após o ensaio (Dowling *et al.*, 2005).

A parede 3B teve uma rotura semelhante à parede 3A. Apesar da sua rotura se verificar para um nível de deslocamentos sensivelmente maior, a utilização de pilares nos cantos convergentes mostrou-se insuficiente ao ligar os panos da parede, como sugere a Figura 11 (Dowling *et al.*, 2005).



Figura 11 – Estado da parede 3B após o ensaio (Dowling *et al.*, 2005).

A parede 3E mostrou um desempenho significativamente melhor que as outras duas atrás apresentadas, o que se pode comprovar pelos danos visíveis no final do ensaio (Figura 12). A utilização de bambu no seu exterior permitiu uma melhor redistribuição da

energia dissipada no interior da estrutura. A fissuração apareceu de uma forma mais gradual e menos acentuada e profunda (Dowling *et al.*, 2005).



Figura 12 – Estado da parede 3E após o ensaio (Dowling *et al.*, 2005).

A parede 3G mostrou um comportamento muito deficiente, verificando-se uma rotura mais frágil que a correspondente à parede sem reforço. Os danos indicam que o reforço interno com canas de bambu introduziu descontinuidades à estrutura, criando planos de fraqueza (Figura 13). Essas descontinuidades explicam também a baixa frequência obtida pela parede antes do ensaio (Dowling *et al.*, 2005).



Figura 13 – Estado da parede 3G após o ensaio (Dowling *et al.*, 2005).

A parede 3I foi a que mostrou um melhor comportamento face à sua simulação na mesa sísmica. Para uma maior intensidade de deslocamentos impostos verificou-se uma ausência de danos severos. Os danos mostrados pela Figura 14, observam-se para uma



intensidade de deslocamentos e acelerações impostos, muito superiores quando comparados com as outras unidades ensaiadas (Dowling *et al.*, 2005).

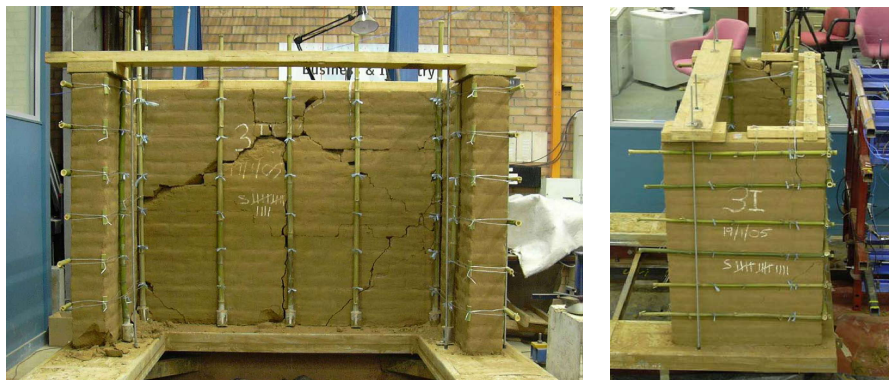


Figura 14 – Estado da parede 3I após o ensaio (Dowling *et al.*, 2005).

Deste estudo pode-se concluir que o reforço em alvenarias de adobe é relativamente simples e de fácil execução, utilizando técnicas e materiais de baixos custos. Verifica-se também que as alvenarias de adobe quando combinada com soluções de reforços, apresentam-se bastante eficazes ao sismo (Dowling *et al.*, 2005).

Os materiais sintéticos de produção industrial, têm-se vindo a afirmar como uma solução bastante económica e disponível no mercado para o uso de reforços em alvenarias de adobe. Um dos projectos de investigação realizado por Blondet *et al.*, (2004) consistiu na realização de ensaios cíclicos, de muros à escala real, em que algumas técnicas usadas para o reforço foram efectuadas com estes tipos de materiais. Foram utilizados diversos reforços, destacando-se: reforço com tubos de plástico de PVC verticais na parte interior do muro, e malhas plásticas horizontais, embutidas na argamassa, em cada quatro fiadas; reforço exterior com geomalha do tipo “Tensar”, coberta com estuque de barro (Figura 15); reforço com malha electrosoldada (Blondet *et al.*, 2004).



Figura 15 – Ensaio do muro com reforço exterior de geomalha (Blondet *et al.*, 2004).

Neste trabalho de investigação, comprovou-se que o uso de redes exteriores geossintéticas aumenta a resistência e a capacidade de deformação dos muros, conseguindo-se um comportamento sísmico comparável ao obtido com reforços de cana e superior ao obtido com o uso de malha electrosoldada (Blondet *et al.*, 2004).

Num outro estudo, também efectuado com materiais de base sintética, realizaram-se ensaios de simulação sísmica em dois modelos de vivendas: o primeiro modelo estava reforçado com uma malha sintética (geomalha, Figura 16) colocada em toda a superfície interior e exterior das paredes; o segundo modelo contava com um reforço exterior de canas na vertical e cordas na horizontal (Torrealva e Acero, 2005).



Figura 16 – Modelo reforçado com malha exterior de plástico (Torrealva e Acero, 2005).

Os modelos descritos foram ensaiados com e sem reboco. Com a ausência de reboco verificou-se uma melhoria nas capacidades de deformação, mas as resistências de corte e de flexão mantiveram-se praticamente inalteradas. Quando estes modelos estão embebidos pela argamassa de reboco consegue-se uma melhoria notável, tanto nas suas capacidades de deformação como nas suas resistências. O reboco assim é indispensável para se conseguir um bom controlo da fissuração e para se evitar um colapso frágil dos muros (Torrealva e Acero, 2005).

Conclui-se que os materiais industriais utilizados nestes estudos aumentam a capacidade de deformação e a resistência dos muros de adobe, sempre e quando o reforço seja efectuado com um tecido contínuo em ambas as direcções do plano do muro, e se encontre embebido pelo reboco de barro ou cal (Blondet *et al.*, 2004; Torrealva e Acero, 2005).

Vários Professores Investigadores, no México, realizaram ensaios de flexão lateral em muros de adobe compactado, reforçados com malhas de aço.

Foram efectuadas três séries de ensaios para determinar a resistência à flexão dos muros: a primeira, sem qualquer reforço; uma segunda, reforçada com malha de galinheiro; e a última, com malha electrosoldada. Os muros reforçados foram recobertos com uma capa de argamassa à base de cimento e areia, com 2cm de espessura (Ruiz *et al.*, 2003).

Em geral, as paredes mostraram um aumento significativo na resistência à flexão estática lateral: os muros reforçados com malha galinheiro conseguiram resistir a uma carga média de 794.9kg; os muros reforçados com malha electrosoldada resistiram a uma carga de 1669kg. Comparando-se com os valores obtidos do muro ensaiado sem reforço, os resultados foram positivos, dado que este apenas resistiu a uma carga média de 430.7kg. Verificou-se também durante o ensaio, que os muros reforçados apresentavam um comportamento mais dúctil (Ruiz *et al.*, 2003).

Averiguou-se com os resultados obtidos que os muros reforçados com malha hexagonal (galinheiro) obtiveram um aumento de 85% de capacidade de carga, e os muros com malha electrosoldada adquiriram um aumento de 288%. No que respeita ao cálculo da resistência nominal, a série do grupo sem reforço obteve uma resistência média de 4.18kg/cm<sup>2</sup>. Obtendo a série com malha hexagonal uma resistência média de 4.94kg/cm<sup>2</sup> (18%), e os muros reforçados com malha electrosoldada adquiriram 1240kg/cm<sup>2</sup> (197%) da

mesma resistência média, o que representa um aumento muito significativo (Ruiz *et al.*, 2003).

Yamin *et al.*, (2005) com o intuito de aumentar os níveis de conhecimentos existentes sobre estudos de reforços já efectuados em construções de alvenaria de adobe, construíram uma série de vivendas à escala de 1:5 (Figura 17), submetendo-as a ensaios em mesa vibratória. Foi aplicada uma sobrecarga de 35kg, de forma a tornar o ensaio o mais real possível.




Figura 17 – Vivendas ensaiadas (Yamin *et al.*, 2005).

Verificou-se que a rotura das paredes ocorreu para um deslocamento de 14.4mm para a vivenda sem reforço, e para um deslocamento de 44.4mm para as outras duas reforçadas. A vivenda sem reforço apresentou uma rotura característica por colapso frágil dos muros, não suportando o peso da cobertura. Na vivenda com reforço de malha a fractura verificou-se na parte superior dos muros e na cobertura. Na vivenda reforçada com madeira, a rotura ocorreu devido à falta de ligação entre os vários panos da parede (Yamin *et al.*, 2005).

Torrealva e Acero, (2006), com base na intensidade do sismo de 31 de Maio de 1970, que ocorreu no Peru, propuseram vários modelos de alvenaria de adobe reforçados com canas de bambu e com rede geosintética industrial. Estes modelos foram postos numa mesa vibratória e comparados com um outro estudo efectuado em 2001 pelos mesmos autores. Os modelos foram testados com acelerações progressivas até 1g para o reforço com bambu, e com 1.2g para o reforço com rede geosintética (Tabela 6).

Tabela 6 – Comparação e resultados dos cinco modelos ensaiados (Torrealva e Acero, 2006).

Características do modelo	Comportamento último	Estado final do modelo
Modelo com rede natural exterior, cana vertical e corda “cabuya” horizontal.	Fendas verticais em cada esquina. Esmagamento da parede Sul perto da padieira, rotura das uniões nas paredes Leste e Oeste mas de resto estável.	
Modelo reforçado com rede geosintética.	Fendas em cada esquina das paredes. Deslocamento da face Norte de 7cm da base. A estrutura permanece em equilíbrio estável.	
Modelo sem reforço.	Fase com $PGA = 0.8g$ , as paredes verticais e as esquinas ruíram. Com $PGA = 1.0g$ ocorre o colapso parcial da estrutura.	
Modelo reforçado com rede soldada coberta por argamassa de cimento.	Fase com $PGA = 1.2g$ , verificou-se um colapso da parede sul inclusive da padieira. Ocorreu um desliz em relação à base de 15cm. Rotura de grandes partes da parede, sendo a rotura final movediça.	
O mesmo reforço do modelo anterior contendo mais uma viga de betão armado a nível da padieira.	Fase com $PGA = 1.2g$ , verificou-se um fracasso a nível da padieira. Colapso de paredes não imbutidas e deslizamento de 10cm na base. A rotura final foi movediça.	

Outros autores no Peru têm vindo a desenvolver diversas técnicas de reforços neste tipo de construções (Memari e Kauffman, 2005).

## **CAPÍTULO 3 - Descrição da intervenção efectuada na parede de alvenaria de adobe**

Este capítulo é dedicado à descrição dos trabalhos e ensaios efectuados a uma parede com geometria em planta em I, à escala real, construída em laboratório. A parede foi sujeita a uma campanha experimental de ensaios dinâmicos e, posteriormente, cíclicos e dinâmicos no plano.

### **3.1 Construção da parede de alvenaria de adobe**

Foi construída uma parede com geometria em planta em I, à escala real, no Laboratório do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro. A parede foi construída utilizando blocos de adobe de  $29 \times 45 \times 12 \text{ cm}^3$  provenientes de uma demolição que ocorreu na zona de Aveiro, e uma argamassa à base de cal hidratada de modo a simular uma construção representativa do património existente no distrito. Foi usado um traço de 1:1:2 (cal hidratada, terra ligeiramente argilosa e areia) para o fabrico da argamassa de assentamento e, posteriormente, de reboco. A primeira fiada foi realizada com os blocos colocados a par na sua maior direcção (Figura 18), utilizando uma argamassa à base de cimento para permitir uma ligação mais rígida e sólida à fundação (Pereira, 2008).



Figura 18 – Primeiras fiadas da parede (Pereira, 2008).

Durante a construção, tentou-se manter sempre umas juntas de assentamento regulares de 2.5cm. O resultado final foi uma parede com uma altura de 3.07m, um comprimento de 3.5m e uma espessura média de 0.29m (Figura 19a). Após a construção da parede e decorrido o tempo de cura, procedeu-se ao seu reboco (Figura 19b). Apesar da grande irregularidade que os blocos apresentavam, este ficou com uma espessura média de 2cm, podendo em algumas zonas, muito pontualmente, atingir os 3cm (Pereira, 2008).



a) parede com blocos a vista



b) parede rebocada



c) parede caiada

Figura 19 – Fases finais da construção da parede de adobe (Pereira, 2008).



Para uma melhor visualização das fissuras durante o ensaio, mantendo as mesmas técnicas utilizadas antigamente para este tipo de construções à base de adobe, procedeu-se à caiação da parede com cal hidratada (Figura 19c).

### 3.2 Instrumentação usada na realização dos ensaios

A parede foi sujeita a uma série de ensaios dinâmicos e, posteriormente, cíclicos e dinâmicos no plano. Para a realização dos ensaios foi colocada uma carga vertical uniformemente distribuída de 20kN no topo da parede, de forma a simular as acções permanentes, nomeadamente o peso das coberturas em madeira existentes nas construções, e sobrecargas. Essa sobrecarga foi aplicada no topo da parede, através de um pórtico metálico (Figura 20a).

A aplicação da força à parede durante o ensaio efectuou-se através de um actuador hidráulico com capacidade de impulsionar uma carga de 90kN, ligado a um computador, que controlava os ciclos de aplicação da carga (Figura 20b). O actuador continha uma célula de carga do tipo TC4 da marca AEP-Tranducers que permitia medir a intensidade da força aplicada.

Todos os deslocamentos sofridos pela parede, durante o ensaio, foram registados através de transdutores LVDT (Figuras 20c, 20e, e 20f) fixos a estruturas externas.

Para o registo da evolução das frequências da parede no decorrer do ensaio, foi utilizado um sismógrafo localizado no seu topo (Pereira, 2008).



a) sobrecarga



b) actuador



c) transdutores verticais



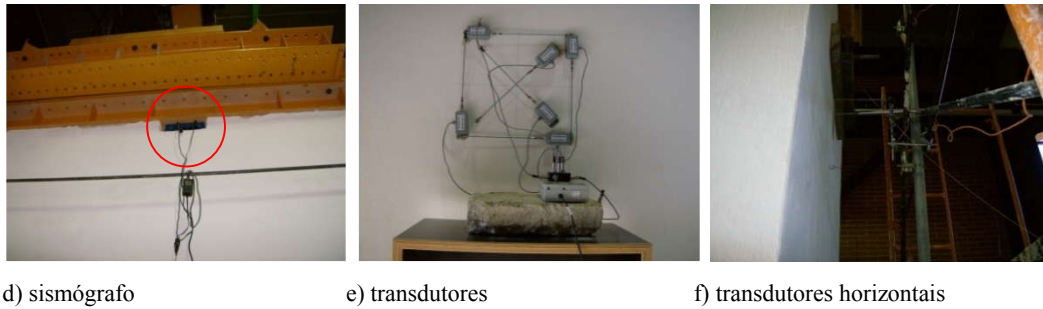


Figura 20 – Equipamentos usados nos ensaios.

### 3.3 Evolução dos ensaios e danos provocados na parede

O ensaio cíclico executou-se através da aplicação de uma força cíclica de amplitude crescente, aplicada a 2.5m de altura da parede cotada desde a primeira fiada, até à sua rotura.

Numa primeira fase do ensaio, verificou-se a formação de uma grande fenda oblíqua na alma da parede (Figura 21a). Com a continuação da aplicação da força, formaram-se duas fendas mais profundas em forma de X como se pode verificar pela Figura 21b (Pereira, 2008).

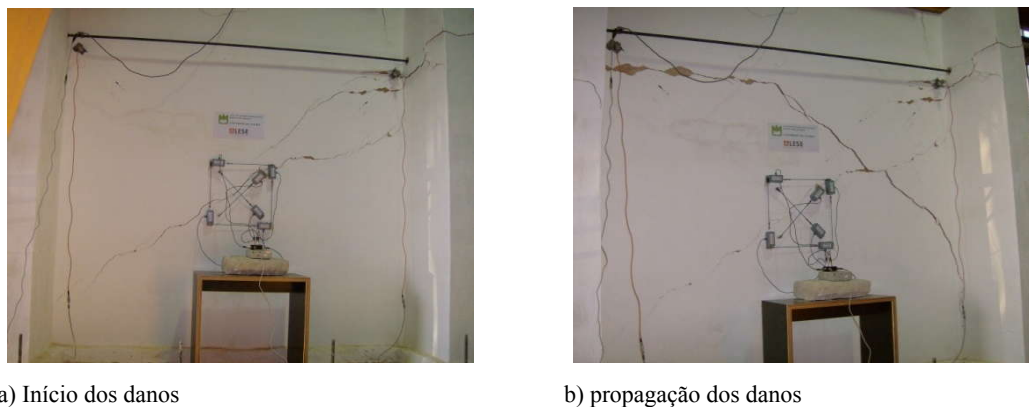


Figura 21 – Evolução dos danos (face Sul) (Pereira, 2008).

Pelas Figuras 21 e 22 observa-se que os danos foram severos, tendo as fendas se prolongado pelo interior da parede até à face oposta. Na Figura 22b, observa-se que ocorreu um deslocamento diferencial lateral, no mesmo pano da parede, originando um desalinhamento na verticalidade da mesma.



Figura 22 – Danos finais (face Norte) (Pereira, 2008).

### 3.4 Resultados obtidos dos ensaios

#### 3.4.1 Ensaios cíclicos

Do ensaio cíclico, obteve-se um deslocamento no topo da parede de 1mm para a sua capacidade máxima ao corte de 58kN. Na Figura 23, pode-se observar a evolução da força aplicada com o correspondente deslocamento sofrido pela estrutura (Pereira, 2008).

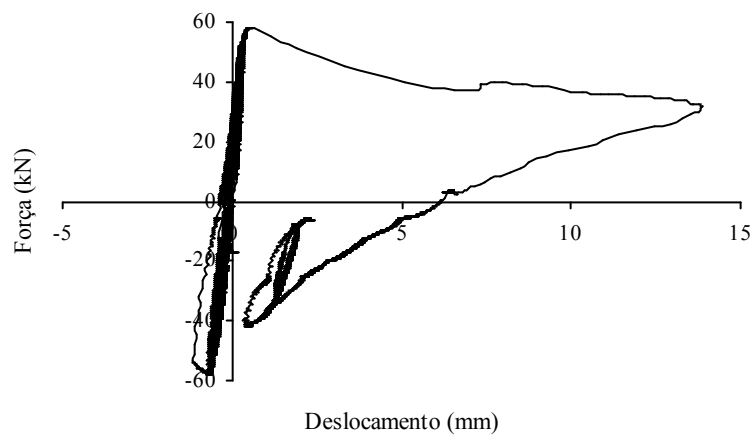


Figura 23 – Força *versus* deslocamento ao nível da aplicação da força (adaptado de Pereira, 2008).

Como resultados adquiriu-se ainda, uma resistência residual da parede de 30kN e um deslocamento máximo imposto ao nível da aplicação da força de 13.7mm (Pereira, 2008).

### 3.4.2 Ensaios dinâmicos

Dos ensaios dinâmicos, auferiram-se as seguintes frequências da parede carregada axialmente, ao longo das várias aplicações de carga (Figura 24).

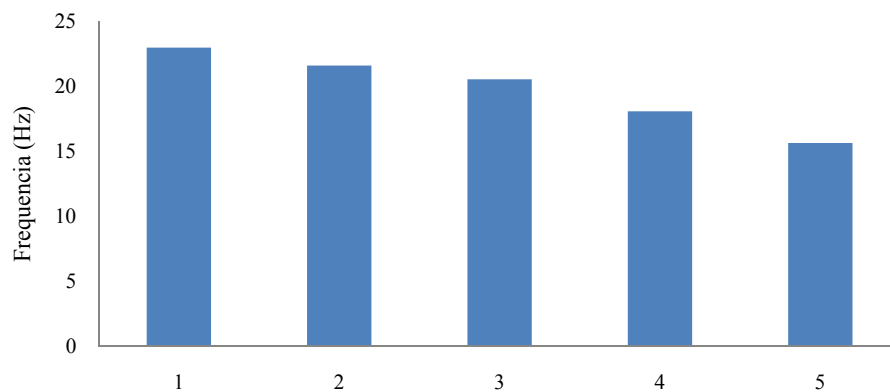


Figura 24 – Evolução das frequências ao longo do ensaio (Pereira, 2008).

Do gráfico podem-se analisar as frequência obtidas antes, durante e após o ensaio. Observa-se, assim, a primeira frequência natural da parede carregada axialmente de 22.95 Hz. Este valor foi decrescendo ao longo do ensaio com os deslocamentos impostos pela carga horizontal. Após os deslocamentos cíclicos de 0.1mm e 0.5mm, a frequência caiu para 21.58Hz e 20.51Hz, respectivamente. Esta diminuição ocorreu devido aos primeiros danos que se foram propagando por toda a parede. Após a rotura, para um deslocamento de 1mm esta decresceu para 18.07Hz e, após todos os ensaios, voltou a cair para um valor de 15.63Hz. Nessas duas fases de cíclicos como os danos foram mais severos, a frequência voltou a decrescer, mas de uma forma mais abrupta, traduzindo-se numa diminuição bastante considerável na rigidez da parede.

### 3.4.3 Ensaios de flexão e compressão aos provetes de argamassa de construção

Após os ensaios efectuados na parede, testaram-se os provetes cujas dimensões eram de  $15 \times 4 \times 4 \text{ cm}^3$  produzidos durante a construção da parede, obtendo-se os correspondentes valores de tensão de rotura representados na Tabela 7.

Tabela 7 – Tensão resistente da argamassa de construção da parede.

Proвете	Tensão de rotura em flexão (MPa)	Tensão de rotura em compressão (MPa)		
		P-1	P-2	Média
1	0.29	0.66	0.65	0.66
2	0.19	0.75	0.77	0.76
3	0.27	0.75	0.67	0.71
4	0.16	0.69	0.66	0.68
5	(*)	0.61	0.56	0.59
6	(*)	0.74	0.58	0.66
Média	<b>0.23</b>			<b>0.67</b>
Mínimo	0.16			0.59
Máximo	0.29			0.76
Desvio padrão	0.06			0.06

(\*) os provetes já se encontravam partidos

Dos resultados obtidos pode-se averiguar uma dispersão idêntica em termos de tensões de rotura. Verifica-se que a tensão de rotura em flexão corresponde a 34% da tensão de rotura em compressão.

## **CAPÍTULO 4 - Estudo dos materiais para a reabilitação da parede de alvenaria de adobe**

Este capítulo teve o intuito de garantir que os materiais utilizados na reabilitação da parede fossem, os mais representativos da sua construção original. Para tal efectuou-se uma pesquisa aos materiais existentes no mercado e desenvolveu-se uma campanha de ensaios experimentais com as possíveis soluções encontradas.

### **4.1 Levantamento dos materiais existentes no mercado**

Após definir-se que a reabilitação da parede ia passar por uma solução, tendo como base o uso de uma rede, foi realizada uma pesquisa a todas as redes existentes em várias lojas e armazéns de construção no distrito de Aveiro. Esta pesquisa prendeu-se com o objectivo de encontrar uma solução que permitisse à parede recuperar a resistência do seu estado original e melhorar a sua ductilidade. Depois do estudo concluído, verificaram-se dois aspectos condicionantes para a selecção dos materiais a usar na reabilitação:

- A necessidade de garantir uma solução económica, que possa ser facilmente aplicada e desenvolvida por um país em crise ou subdesenvolvido;
- Garantir sempre uma boa compatibilidade com os materiais utilizados nas construções originais em adobe.

O levantamento efectuado passou pela aquisição de amostras dos vários tipos de redes existentes no mercado. Com a informação obtida construiu-se uma tabela exemplificativa com as características geométricas e preços das amostras recolhidas (Tabelas 8 e 9).

Tabela 8 – Redes sintéticas.




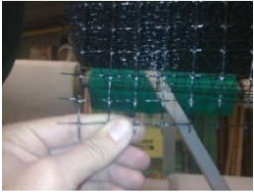
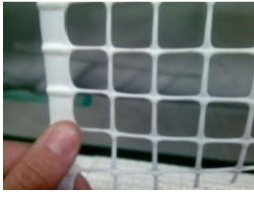
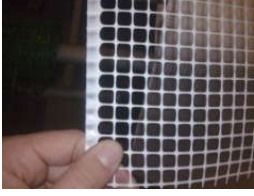

Rede	Especificações	Imagem	Preço	Quem comercializa
Rede baby verde	Aberturas de 12mm Hexagonal h=1.0m		2.19€ / ml 2.19€ / m <sup>2</sup>	Armazéns Reis
Rede plástica verde	M=5×5mm h=1.0m		2.06€ / ml 2.06€ / m <sup>2</sup>	Armazéns Reis Maxmat
Rede plástica verde	M=10×10mm h=1.0m		2.06€ / ml 2.06€ / m <sup>2</sup>	Armazéns Reis Maxmat
Rede cintaflex preta	M=15×20mm h=1.0m		0.72€ / ml 0.72€ / m <sup>2</sup>	Armazéns Reis Maxmat
Rede plástica branca	M=20×20mm h=1.0m		2.06€ / ml 2.06€ / m <sup>2</sup>	Armazéns Reis Maxmat
Rede plástica branca	M=10×10mm h=1.0m		2.06€ / ml 2.06€ / m <sup>2</sup>	Armazéns Reis Maxmat
Rede plástica branca	M=5×5mm h=1.0m		2.06€ / ml 2.06€ / m <sup>2</sup>	Armazéns Reis Maxmat

Tabela 8 – Redes sintéticas (cont).





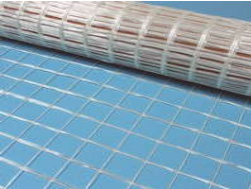
Rede	Especificações	Imagem	Preço	Quem comercializa
Rede plástica silver	M=10×10mm h=1.0m		2.06€ / ml 2.06€ / m <sup>2</sup>	Armazéns Reis
Fibra de vidro	M=5×5mm h=0.50m Rolo de 50m		30€ / rolo 3.33€ / ml 3.33€ / m <sup>2</sup>	Armazéns Reis Maxmat
Rede de reboco azul	M=10×10mm Rolo de 1×50m		19.61€ rolo 0.39€ / ml 0.39€ / m <sup>2</sup>	Majodir
Rede de reboco branca	M=5×5mm Rolo de 1×50m		18.16€ rolo 0.36€ / ml 0.36€ / m <sup>2</sup>	Majodir
Rede fibra de vidro para cofragens	Rolo de 1.20×100m		340€ rolo 33.0€ / ml 27.5€ / m <sup>2</sup>	Majodir

Tabela 9 – Redes metálicas.



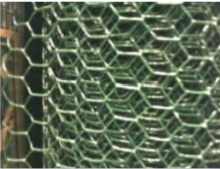
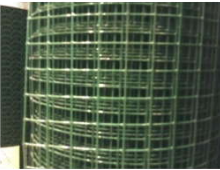
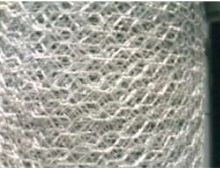
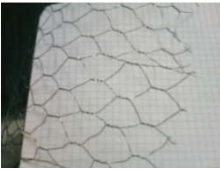









Redes metálicas	Especificações	Imagem	Preço	Quem comercializa
Bet. Casant Plast Malha	l=5m h=0.50m M=12.5×12.5mm Ø=0.90mm		15.91€ rolo 3.18€ / ml 6.36€ / m <sup>2</sup>	Armazéns Reis
Bet. Hexanet Plast Malha	l=10m h=0.50m M=13×13mm Ø=1.0mm		16.80€ rolo 1.68€ / ml 3.36€ / m <sup>2</sup>	Armazéns Reis
Bet. Casanet Galv Malha	l=10m h=1.0m M=12.5×12.5mm Ø=0.65mm		46.86€ rolo 4.69€ / ml 4.69€ / m <sup>2</sup>	Armazéns Reis
Bet. Casanet Plast Malha	l=5m h=1.0m M=12.5×12.5mm Ø=0.90mm		46.94€ rolo 9.39€ / ml 9.39€ / m <sup>2</sup>	Armazéns Reis
Rede Hexagonal Zincada Malha F	h=0.8m M=13×13mm Ø=0.70mm		1.06€ / ml 1.33€ / m <sup>2</sup>	Armazéns Reis
Rede Hexagonal Zincada Malha C	M=19×19mm h=0.8m		0.80€ / ml 1.0€ / m <sup>2</sup>	Armazéns Reis
Rede Hexagonal Zincada Malha F	M=13×13mm h=1.0m		1.31€ / ml 1.31€ / m <sup>2</sup>	Armazéns Reis
Rede Hexagonal Zincada Malha	M=13×13mm h=1.20m		1.57€ / ml 1.31€ / m <sup>2</sup>	Armazéns Reis
Rede Hexagonal Zincada Malha	M=19×19mm h=1.20m		1.20€ / ml 1.0€ / m <sup>2</sup>	Armazéns Reis



Tabela 9 – Redes metálicas (cont).

Redes metálicas	Especificações	Imagem	Preço	Quem comercializa
Rede Hexagonal Zincada Malha	M=19×19mm h=1.0m		1.0€ / ml 1.0€ / m <sup>2</sup>	Armazéns Reis
Rede Hexagonal Zincada Malha	M=25×25mm h=1.0m		0.82€ / ml 0.82€ / m <sup>2</sup>	Armazéns Reis
Rede Hexagonal Zincada Malha	M=13×13mm h=1.50m		2.0€ / ml 1.33€ / m <sup>2</sup>	Armazéns Reis
Rede Hexagonal plastificada	M=13×13mm h=1.0m		2.09€ / ml 2.09€ / m <sup>2</sup>	Armazéns Reis
Rede Afternet (electrosoldada)	M=19×19mm h=1,0m		2.65€ / ml 2.65€ / m <sup>2</sup>	Armazéns Reis
Rede Afternet (electrosoldada)	M=12.7×12.7mm h=1.0m		3.55€ / ml 3.55€ / m <sup>2</sup>	Armazéns Reis

Após a análise das várias amostras, concluiu-se que a reabilitação da parede iria ser efectuada com uma rede sintética. Além de estas redes terem um preço substancialmente inferior ao das metálicas, assegura-se que não haverá problemas de corrosão após a sua aplicação. No contacto directo com um material como o adobe, que tem uma elevada capacidade de absorver água, para se garantir um bom funcionamento e durabilidade de uma estrutura, é fundamental eliminar qualquer material que se degrade por acção da corrosão.

Das diversas redes sintéticas observadas, seleccionou-se para a reabilitação da parede a rede Cintaflex preta. Em comparação com as outras, esta rede era a única que apresentava uma maior maleabilidade, permitindo ajustar-se mais espontaneamente às imensas irregularidades dos blocos de adobe. Outros aspectos condicionantes na sua selecção prenderam-se à existência de uma malha rectangular com paredes finas que facilita a impregnação da argamassa de reboco ao adobe e a partir de uma análise visual, verificou-se que a rede apresentava-se pouco vidrada, proporcionando uma melhor adesão ao reboco.

Para garantir uma boa amarração da parede à base e entre a alma e os banzos, recorreu-se ao uso de cantoneiras em PVC (Tabela 10), fixas através de buchas plásticas, do tipo das usadas para segurar o roofmate, (Tabela 11) e fio de nylon (Tabela 12). As cantoneiras escolhidas foram as de 50×50×2600mm, pois abrangiam uma maior área, o que facilitava a sua fixação com as buchas plásticas.

Tabela 10 – Cantoneiras em PVC.

Cantoneiras	Especificações	Preço	Quem comercializa
Cantoneira plástica branca	20×20×2600mm	2.38€ 0.92€ / ml	Armazéns Reis IZI
Cantoneira plástica branca	25×25×2600mm	3.0€ 1.15€ / ml	Armazéns Reis IZI
Cantoneira plástica branca	30×30×2600mm	3.58€ 1.38€ / ml	Armazéns Reis IZI
Cantoneira plástica branca	35×35×2600mm	5.06€ 1.95€ / ml	Armazéns Reis IZI
Cantoneira plástica branca	50×50×2600mm	7.39€ 2.84€ / ml	Armazéns Reis IZI




Das várias buchas plásticas existentes no mercado, as escolhidas foram as da Hilti, pois além do sistema de bucha com prego plástico conseguir uma resistência ao arranque muito boa, possuíam uma superfície da base com bastantes discontinuidades e rugosidades, o que lhes conferia uma óptima aderência à argamassa de reboco.

Tabela 11 – Buchas plásticas.

Fios	Especificações	Preço	Quem comercializa
Corda de Nylon (Embalagem)	Rolo 20m Ø=5mm	1.50€ 0.07€ m / ml	Armazéns Reis
Cabo Nylon Entrelaçado	Ø=3mm	0.25€ / ml	Armazéns Reis

Seleccionou-se o fio tendo em conta a sua resistência à tracção de 1.8kN e a sua elasticidade, que lhe facultaria uma amarração mais eficaz.

Tabela 12 – Fios de nylon.

Buchas	Especificações	Imagem	Preço	Quem comercializa
Buchas com pino IZ 8×70mm	Comprimento=70mm Carga de tração=0.2kN Material=Polipropileno		Saco de 250 unidades 40€	Hilti
Buchas de fixação de revestimentos	Diâmetro=40mm Comprimento=70mm		Sacos de 50 unidade 5€	Armazéns Reis Venturas
Buchas de fixação de roofmate	Diâmetro=60mm Comprimento=95mm		Sacos de 50 unidades 12.5€	Venturas

## 4.2 Ensaios aos materiais a usar na reabilitação da parede

Foi efectuada uma série de ensaios de flexão, compressão e tracção aos materiais a usar na reabilitação da parede de adobe. Com os resultados obtidos, pode-se decidir qual o material mais adequado ao trabalho pretendido. Nos casos em que os materiais foram previamente seleccionados, os resultados obtidos permitiram tirar outras conclusões, quando combinados e confrontados com os valores retirados dos ensaios cíclicos e dinâmicos realizados na parede.

Através da campanha de ensaios experimentais aos materiais, foi possível adquirir uma melhor compreensão do comportamento destes, quando sujeitos a esforços.

#### 4.2.1 Ensaios de flexão aos blocos de adobe

Devido à grande heterogeneidade que os blocos de adobe utilizados na construção da parede apresentavam, realizou-se a estes uma série de ensaios de flexão (Figura 25).

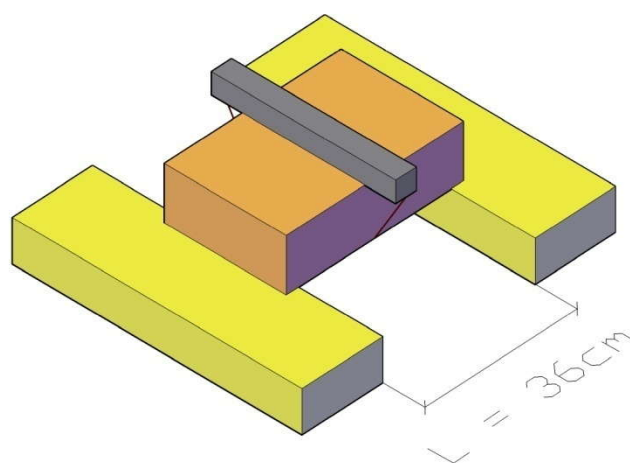


Figura 25 – Esquema do ensaio à flexão dos blocos de adobe.

O valor resistente em flexão que os blocos de adobe apresentaram, foi obtido com recurso a um dinamómetro, amarrado a um cabo de aço que passava a meio vão do bloco de adobe, por dentro de um tubo metálico (Figura 26a) para distribuir a força de uma forma mais uniforme aos blocos, e a um garibaldo que permitia aplicar a carga de uma forma crescente (Figura 26b).



Figura 26 – Ensaio e selagem dos blocos de adobe.

Do tratamento dos resultados obtidos, construiu-se a Tabela 13 com os valores da tensão de rotura em flexão dos blocos ensaiados.

Tabela 13 – Tensão de rotura dos blocos de adobe.

Bloco	Dimensões (cm)			Tensão de rotura (MPa)
	Largura	Comprimento	Altura	$\sigma_t$
1	44.5	30.0	11.0	0.39
2	44.0	30.5	11.0	0.60
3	44.5	31.0	11.0	0.62
4	44.5	29.5	11.5	0.50
5	45.0	30.0	11.0	0.56
6	44.0	30.0	10.5	0.56
7	45.0	30.0	11.5	0.41
8	44.0	30.5	11.0	0.41
9	44.0	31.0	10.0	0.72
10	44.0	30.0	10.0	0.60
Mínimo				0.39
Máximo				0.73
Média				<b>0.54</b>
Desvio padrão				0.11

Obteve-se, desta forma, um valor médio de 0.54MPa de resistência à rotura dos adobes, quando solicitados a esforços de flexão.

Considerando os blocos ensaiados (partidos) representativos dos danos mais severos sofridos pela parede, estudou-se qual seria o melhor material a usar na selagem das fissuras. Como a intenção foi sempre procurar uma solução de reparação, mantendo o mesmo tipo de materiais usados na construção da parede e das edificações existentes com este tipo de alvenaria, procurou-se uma mistura para a selagem à base de cal.

Procedeu-se à selagem dos blocos de adobe, usando 3 composições distintas:

- Goma de cal aérea;
- Goma com 50% de cal aérea e 50% de cal hidráulica;
- Goma de cal hidráulica.

Tabela 14 – Tensão de rotura dos blocos de adobe selados com cal.

Bloco	Selagem	Tensão de rotura (MPa) $\sigma_t$	Percentagem de resistência conseguida (%)
1	50% Cal aérea, 50% cal hidráulica	0.16	41.12
2	Cal hidráulica	0.28	47.19
3	50% Cal aérea, 50% cal hidráulica	0.17	27.75
4	Cal aérea	0.10	18.92
5	Cal hidráulica	0.32	56.72
6	Cal aérea	0.06	10.88
7	Cal hidráulica	0.29	71.00
8	Cal hidráulica	0.24	58.43
9	Cal hidráulica (injecção)	(*)	(*)
10	Cal hidráulica (injecção)	(*)	(*)
Mínimo		0.06	
Máximo		0.32	
Média		<b>0.20</b>	
Desvio padrão		0.10	

(\*) não foi possível efectuar a injecção

Inicialmente, apenas foram selados 6 blocos (Figura 26e), para decidir qual seria a melhor composição para se efectuar a selagem das fissuras existentes na parede. Com os

resultados obtidos (Tabela 14), como era de prever, concluiu-se que a goma de cal hidráulica apresenta uma eficiência de colagem muito superior às outras.

Após o material escolhido para o preenchimento das fissuras, procedeu-se a mais quatro selagens (Blocos 7,8,9 e 10): Duas para tentar aumentar a resistência de colagem conseguida anteriormente, controlando a retracção da goma, através de molhagens repetidas aos blocos de adobe durante o seu tempo de cura (Blocos 7 e 8); As outras duas selagens (Blocos 9 e 10) seriam para averiguar se a zona de ligação do bloco de adobe com a goma de selagem era conseguida a 100%. Para tal, colocou-se uma argamassa de cimento em torno das fissuras, deixando uns tubos plásticos, onde seria efectuada a injeccção, sob pressão, da goma de cal hidráulica. Não foi possível efectuar a injeccção com os meios disponíveis, pois esta apenas é conseguida com recurso a aparelhos de alta pressão.

Controlando a retracção da goma de cal hidráulica (Blocos 7 e 8), conseguiu-se atingir um valor de resistência médio de 64.72%, comparado com os valores obtidos no ensaio aos blocos no seu estado original.

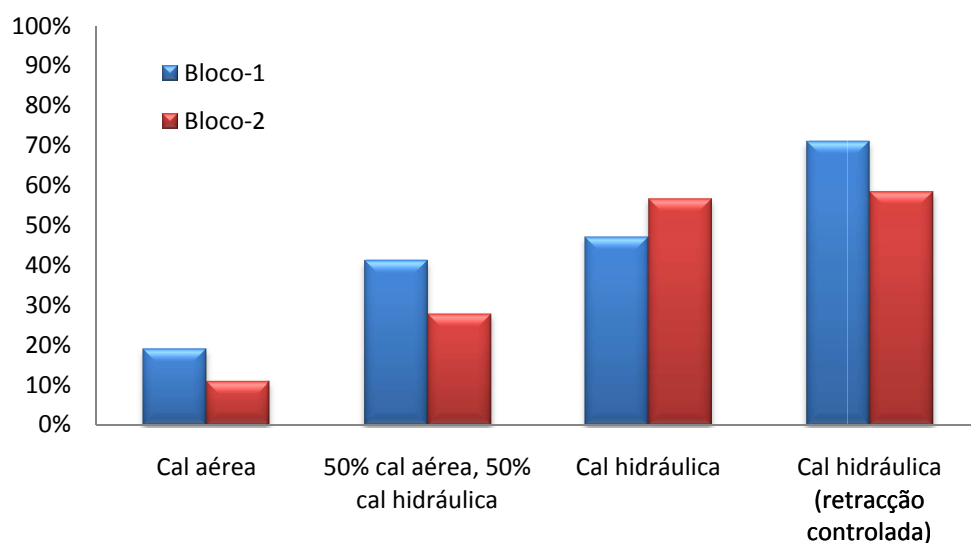


Figura 27 – Percentagem adquirida pelos blocos após selagem.

Estes valores de resistência adquirida pelos blocos de adobe foram obtidos para um tempo de cura da selagem de apenas oito dias (Figura 27). Como as tarefas que envolviam a reparação da parede estavam dependentes destes resultados, não se pôde esperar pelos vinte e oito dias de cura. No entanto, como os ensaios na parede só foram efectuado após esses dias

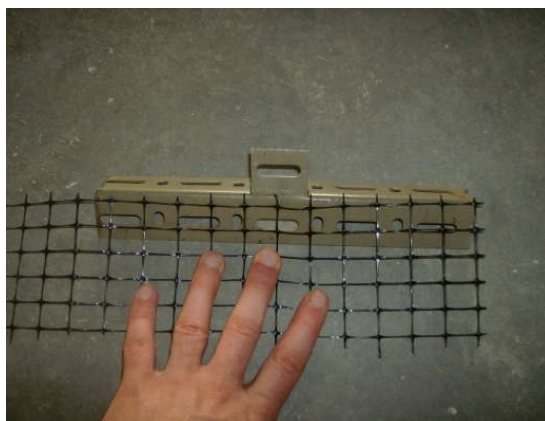
de cura, estimou-se que a eficiência da selagem atingiria valores superiores aos obtidos por estes ensaios. Garantindo-se desta forma uma resistência adquirida pela parede aproximadamente igual à original.

#### **4.2.2 Ensaios de tracção à rede Cintoflex usada na reabilitação da parede**

Um ensaio de tracção é um ensaio que visa o controlo e avaliação das propriedades relevantes após transporte, armazenamento e manuseamento em estaleiro. É também considerado, como um ensaio que visa promover a identificação do geossintético seleccionado para a obra em questão (Lopes, 1993 citado por Lopes, 2005).

Para uma melhor compreensão do efeito que a rede iria repercutir quando se encontra embutida no reboco da parede e sujeita à aplicação de cargas cíclicas, resolveu-se avaliar o seu comportamento à tracção.

O ensaio foi realizado com recurso a quatro cantoneiras cortadas em forma de T, para permitir o agarre à máquina de tracção (Figura 28a), através das garras de cunha metálica ou epoxi (Figura 28b). Este ensaio foi efectuado a uma velocidade de 3mm por minuto e a uma temperatura ambiente de 22°.



a) cantoneira de fixação da rede



b) máquina de tracção

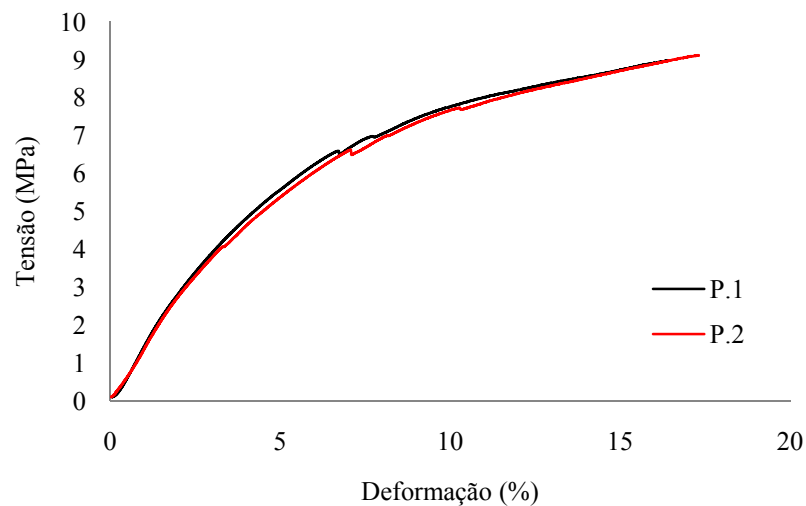
Figura 28 – Esquema geral do ensaio.



Tabela 15 – Resultados tensão deformação da rede Cintoflex.

Redes	Dimensões (cm)		Tensão de rotura (MPa)	Deformação máxima (%)
	Largura	Comprimento	$\sigma_t$	$\varepsilon$
1	18.5	22.5	8.98	17.00
2	18.5	23.5	9.11	18.00

Com estes resultados (Tabela 15), pode-se equiparar a resistência à tracção da rede em 1/3 da resistência de um aço fraco.

Figura 29 – Curva tensão *versus* deformação.

Da análise ao gráfico tensão *versus* deformação, verifica-se que ao longo do ensaio existem pequenas quebras nas curvas (Figura 29). Esses pequenos decréscimos de tensão ocorrem devido ao rompimento de pequenas fibras da rede, ou de uma forma não visível durante o ensaio a um ajustamento (esticamento) da rede na zona das agarras. Como esses possíveis rompimentos apenas se traduzem em pequenas perdas de resistência pontual, a máquina prossegue com o ensaio até nova perda de tensão mais significativa que se traduza na rotura da amostra. O ensaio foi controlado em termos de força, dado que com os meios disponíveis não foi possível efectuar-se o seu controle em deslocamentos.

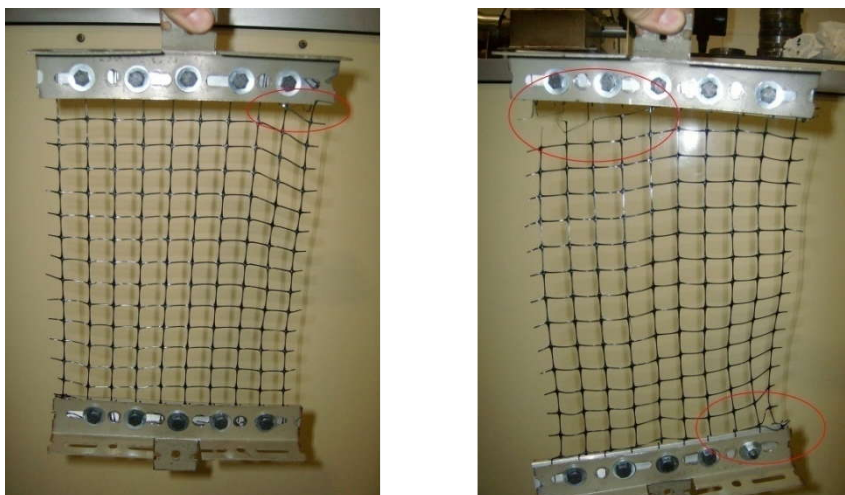


Figura 30 – Antes e após o ensaio dos provetes.

A Figura 30 mostra o modo de rotura dos dois provetes ensaiados. Apesar do esticamento da rede se verificar em toda a sua largura, garantido pelas rótulas existentes na extremidade interior das agarras da máquina de tracção, a rotura dos provetes nunca se deu ao longo de todas as fibras.

## **CAPÍTULO 5 - Caracterização do comportamento estrutural da parede de alvenaria de adobe reforçada**

Neste capítulo apresenta-se uma descrição das tarefas efectuadas na reparação e reforço da parede. Com o intuito de verificar a eficiência da reabilitação, realizou-se novamente uma série de ensaios experimentais com o mesmo esquema geral presente no Capítulo 3, comparando-se os resultados obtidos.

### **5.1 Descrição da reabilitação da parede de alvenaria de adobe**

A primeira fase de intervenções na parede passou pela reabilitação das zonas fracturadas com o ensaio anteriormente efectuado. A segunda intervenção foi dedicada exclusivamente ao seu reforço com recurso à rede referida no Capítulo 4.

#### **5.1.1 Reparação dos danos**

A reparação dos danos existentes na parede compreendeu um período de três dias em que foram realizadas diversas tarefas. De seguida enunciam-se essas tarefas desenvolvidas, de uma forma detalhada e cronológica.

8 de Março de 2009:

- Procedeu-se à preparação do local de trabalho bem como das ferramentas a utilizar;
- Começou-se com o corte pequenos pedaços de tubo com cerca de 25cm de comprimento. (O tubo tem 12mm de diâmetro interior e cerca de 5mm de espessura);
- Pregaram-se, na ponta dos tubos, pregos de diâmetro de 2mm (Figuras 31a, e 31b). (Estes pregos permitiram que o tubo não se solte do buraco quando se proceder ao enchimento da juntas sobre pressão);
- Fez-se a abertura dos buracos na parede sobre o contorno das fissuras, espaçados em cerca de 0.20m (Figura 31c). Para tal, utilizou-se uma broca de 14mm de diâmetro. Algumas furações foram efectuadas em três direcções no plano da fenda, de forma a facilitar o futuro espalhamento da calda de reparação no seio destas;
- Sopraram-se as furações, com a ajuda de um tubo de maior comprimento, para remover as partículas mais finas antes da colocação definitiva dos tubos de injeção;
- Colocaram-se os tubos de injeção nos buracos, com as pontas que têm o prego voltadas para o interior da parede. Fez-se pressão, para que estes penetrassem o máximo possível (cerca de 0.10m, valor correspondente à profundidade do buraco efectuado previamente). No final, rodaram-se, para garantir uma melhor fixação destes à parede. Em alguns lados, onde as fissuras eram menores, os tubos apenas penetravam 0.05m. Por vezes, a ponta do tubo era espalmada, de forma a facilitar a sua entrada no buraco;
- Abriu-se um rasgo com cerca de 1 a 2cm de profundidade e 2 ou 3cm de largura, segundo a orientação das fendas, com o auxílio de uma colher triangular bicuda (Figura 31e);
- Molhou-se o rasgo com água em abundância, com a ajuda de uma trincha;
- Produziu-se a argamassa de selagem, enquanto se molhou o rasgo. A areia utilizada na argamassa foi peneirada com um peneiro de malha de 1.19mm (Peneiro nº 16). Como ligante, utilizou-se cal hidráulica no traço 1:3. A água foi adicionada a olho, até se obter a consistência desejável (mais para uma argamassa dura);
- Preencheram-se os rasgos com a argamassa de selagem produzida (Figura 31f);
- Efectuou-se uma maior pressão com a ponta da colher ou mesmo com o dedo entre o tubo e o rasgo (buraco), nas zonas envolventes dos tubos.

10 de Março de 2009:

- Efectuou-se com o equipamento de injeção uma molhagem do interior das fissuras, através dos tubos embutidos na parede.

11 de Março de 2009:

- Molhou-se as faces exteriores da parede;
- Produziu-se a goma destinada ao preenchimento das fissuras existentes na parede. Para a execução da goma, procedeu-se à crivagem da cal hidráulica, com uma rede metálica de malha 1×1mm; depois, colocou-se um pouco de água num balde; em seguida, foi-se juntando a cal hidráulica. Para se efectuar a mistura entre a cal e a água, utilizou-se um berbequim com uma ponteira misturadora (Figura 31i);
- Colocou-se a goma produzida dentro da panela de injeção;
- Ligou-se o compressor à panela de injeção e abriram-se as válvulas de segurança;
- Procedeu-se ao início da injeção da calda nas fissuras da parede, de baixo para cima (Figura 31j). Ao retirar a ponteira de injeção dos tubos colocados nas fissuras, dobraram-se e prenderam-se com um arame de modo a impedir a saída da calda. Sempre que a calda começava a sair num tubo imediatamente acima ou na face oposta da parede, selava-se o tubo através da sua dobragem e insistia-se por mais alguns instantes na injeção da calda (Figura 31k). Por vezes, a injeção era interrompida para se mexer a goma através de uma manivela existente na panela de injeção, de modo a evitar-se que esta comesse a ganhar presa.



a) pregagem dos pregos



b) mangueira de injeção



c) furação da parede



d) posição final das mangueiras



e) abertura de rasgos



f) selagem dos rasgos



g) selagem completa



h) panela de injeção



i) produção da goma



j) injeção da goma



k) controlo da injeção

Figura 31 – Sequências de tarefas realizadas na reparação da parede.

### 5.1.2 Reforço da parede

O reforço da parede, tal como atrás referido, passou pela aplicação de uma rede geosintética fixada com recurso a cantoneiras em PVC, a um fio de nylon de alta resistência e a pregos com buchas plásticas. Na Figura 32 visualiza-se o esquema do reforço efectuado na parede.

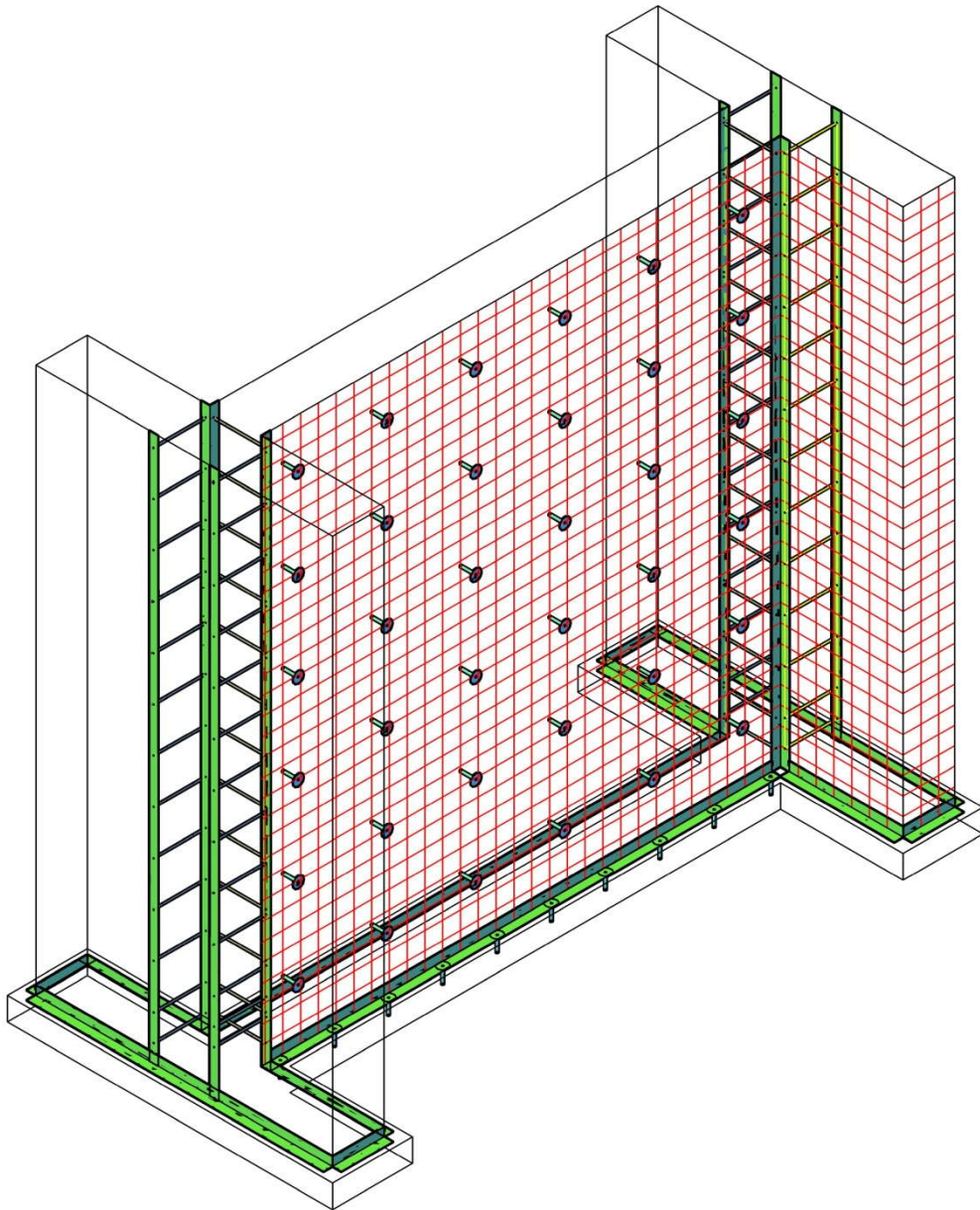


Figura 32 – Esquema do reforço da parede de alvenaria de adobe.

Tal como a reparação da parede, o seu reforço também envolveu uma série de tarefas que se prolongaram no decorrer de aproximadamente seis dias. Essas tarefas apresentam-se em seguida de uma forma detalhada:

1 e 2 de Abril de 2009:

- Procedeu-se à remoção do reboco com o auxílio de um martelo eléctrico (Figura 33a).

7 de Abril de 2009:

- Cortaram-se numa primeira fase, tiras de rede com largura de 30cm para reforçar as zonas mais fissuradas da parede (Figura 33b). Em seguida aplicaram-se essas tiras na parede, fixando-as com buchas e correspondentes pregos plásticos. Para a fixação das buchas foi necessário abrir previamente um furo de 6mm com o berbequim. Durante a aplicação das tiras de rede era sempre muito importante garantir que estas ficavam bem esticadas;
- Aplicou-se em torno da parede a primeira fiada de rede. Esta fiada apenas se fixou com as buchas, sem se efectuar as suas pregagens. Procedeu-se desta forma, para que após a aplicação das cantoneiras fosse possível ajustar e esticar a rede (Figura 33c).

8 de Abril de 2009:

- Continuou-se com a fixação das fiadas seguintes de rede em torno da parede, garantindo-se sempre uma sobreposição de rede de 20cm (Figura 33d);
- Efectuou-se a furação das cantoneiras e dos perfis laminares em PVC com uma broca de 10mm. Esta furação é de extrema importância, para uma melhor aderência da argamassa. De forma a otimizar o rendimento desta tarefa, foram sobrepostas até três cantoneiras, efectuando-se assim três furações em simultâneo (Figura 33e);
- Soprou-se com um compressor de ar, todas as superfícies em que iriam assentar as cantoneiras;



- Fixaram-se as cantoneiras da base. Inicialmente, esta fixação realizou-se na vertical com bucha e prego, e na direcção horizontal com fio. Como a “cozedura” com o fio de nylon estava a revelar-se um processo bastante complexo e moroso, e como a fixação com as buchas apresentava-se com uma boa eficiência, optou-se por este segundo método de fixação nas duas direcções (Figura 33f);
- Firmaram-se, as cantoneiras e os perfis verticais. Após estes se encontrarem alinhados segundo a parede, foi efectuada a furação pela qual iria passar o fio de nylon a cada duas fiadas de adobe. Para se efectuar a passagem do fio pelas furações, criou-se uma espécie de espia em arame queimado (Figura 33g). O fio passava pelas cantoneiras e pelos perfis formando um quadrado, simulando um estribo (Figura 33h). A cada metro de altura, o fio era emendado para garantir que este se encontrava sempre bem esticado (Figura 33i). Ao fixarem-se as cantoneiras nos cantos, tal como esperado, verificou-se que ocorreu um grande ajustamento (esticamento) da rede.

9 de Abril de 2009:

- Esticou-se a rede por fiadas, começando-se de baixo para cima. A rede era esticada, enquanto se iam aplicando as buchas e pregos. Um operário esticava a rede, enquanto o outro efectuava a furação e procedia logo de seguida à sua fixação com as buchas e pregos (Figura 33j). Por vezes, a bucha era colocada no buraco enviesada, forçando a rede a um maior esticamento;
- Produziu-se uma goma igual à usada na injeção das fissuras, e colocou-se sobre as cantoneiras da base, de forma a melhorar a ligação existente entre estas e a parede (Figura 33k). As restantes cantoneiras foram seladas com um traço de argamassa de areia e cal hidráulica de 3/1;
- Efectuou-se o reboco numa face da parede. Para a argamassa de reboco utilizou-se o mesmo traço utilizado na sua construção (dois de areia e um de saibro por um de cal aérea). O saibro, como continha bastantes pedras de grandes dimensões, foi peneirado com um crivo de malha  $10 \times 10 \text{ mm}^2$ . A areia utilizada corresponde a uma areia do rio com a curva granulométrica expressa na Figura 34. O reboco foi efectuado em duas fases: a primeira correspondente a uma camada de enchimento; a segunda, de regularização e acabamento;

10 de Abril de 2009:

- Procedeu-se à finalização do reboco nos restantes panos da parede (Figura 331);
- Efectuaram-se os remates finais de reboco;
- Realizaram-se as limpezas finais da argamassa de reboco que caiu durante a sua aplicação.

21 e 22 de Abril de 2009:

- Caiu-se a parede. Esta operação não foi efectuada num só dia, pois para se aplicar duas camadas de cal como pretendido, era necessário garantir que a primeira aplicação tivesse uma boa secagem.



a) remoção do reboco



b) reforço com tiras de rede



c) aplicação da 1ª fiada de rede



d) aplicação da rede



e) furação da cantoneiras e perfis



f) fixação das cantoneiras à base



g) amarração com fio de nylon



h) perfis laminares em PVC



i) parede reforçada



j) esticamento da rede



k) selagem das cantoneiras



l) parede após reboco

Figura 33 – Sequencia de operações desenvolvidas no reforço da parede.

Através de uma amostra de 1000g de areia, determinou-se a curva granulométrica correspondente à areia utilizada no fabrico das argamassas (Figura 34). Como o coeficiente de uniformidade deu superior a quatro e a percentagem de cascalho verificada pela curva granulométrica é menor que 15%, classificou-se esta amostra como uma areia bem graduada. Esta classificação efectuou-se através do Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS). Segundo Fernandes (2006) uma areia bem graduada encontra-se classificada como excelente na sua trabalhabilidade como material de construção.

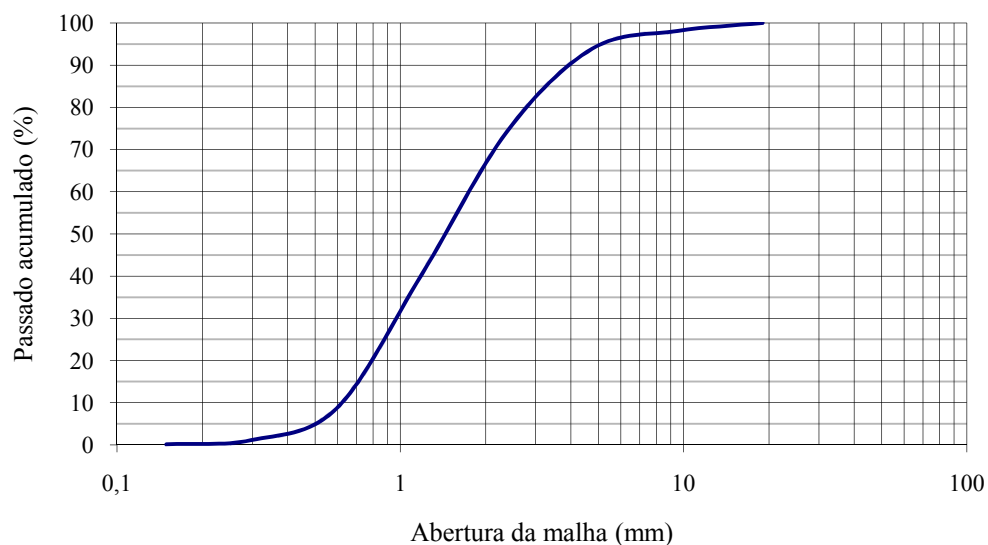


Figura 34 – Curva granulométrica da areia usada na argamassa de reboco.

### 5.1.3 Análise de custos

Considerando o preço actual de 6€ por hora de um oficial de primeira de construção civil e de 5€ o de um servente, teve-se um custo total de mão-de-obra para a reparação e reforço da parede de aproximadamente 792€. Somando o custo de todos os materiais utilizados nas intervenções da parede, obteve-se um valor de 235€. Os preços unitários considerados para os trabalhadores foram obtidos através de uma média ponderada, de tarefas representativas das intervenções efectuadas na parede, com o recurso às fichas de rendimentos do LNEC (Manso *et al.*, 2004).

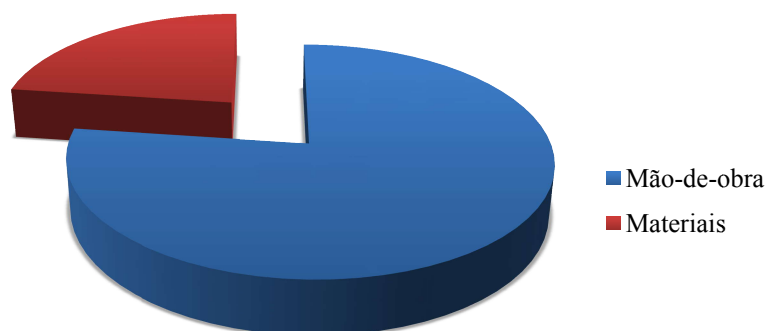


Figura 35 – Análise dos custos de reparação e reforço.

Como se pode observar pela Figura 35, para este tipo de estruturas o custo associado às tarefas de reabilitação encontra-se sobretudo na mão-de-obra. O valor referente ao custo dos materiais representa apenas uma pequena fracção do custo total da obra. Com a evolução e aperfeiçoamento do desempenho e das técnicas usadas para estas reabilitações, estima-se que os custos associados à mão-de-obra sofram um decréscimo bastante significativo.

## 5.2 Preparação dos ensaios cíclicos e dinâmicos

Nesta segunda campanha de ensaios experimentais executados, após o reforço da parede, procurou-se manter o mesmo esquema geral do ensaio, de modo a torná-los o mais comparativos possíveis.

A aplicação da carga horizontal na parede foi efectuada com o recurso a um actuador hidráulico de 100kN, aplicado a uma altura de 2.5m desde a primeira fiada de adobe e centrado na face Oeste. A carga foi controlada em deslocamentos através de um programa de aquisição e controlo desenvolvido pelo LESE, em que a sua intensidade é medida por uma célula de carga do tipo TC4 da marca AEP-TRANSDUCERS.

O registo dos deslocamentos efectuou-se através de transdutores electrónicos. Para os deslocamentos verticais sofridos pela parede durante o ensaio, utilizaram-se transdutores de fio fixos à fundação de betão armado da parede. Nos deslocamentos horizontais, usou-se como sistema de fixação dos transdutores de fio e dos LVDT's amplificados, simples andaimes, em que as suas ligações encontravam-se reforçadas com arames para ganharem

uma maior rigidez, garantindo assim, a inexistência de qualquer movimento por parte destes durante a execução do ensaio. Através das Figuras 36, 37 e 38 podem-se observar as plantas correspondentes à posição dos transdutores.

Para uma melhor identificação e representação das fissuras, criou-se uma grelha quadrada de 0.25m na parede. Esta grelha mostrou-se como uma ajuda importantíssima, na representação com maior rigor, da localização e propagação das fissuras formadas no decorrer do ensaio.

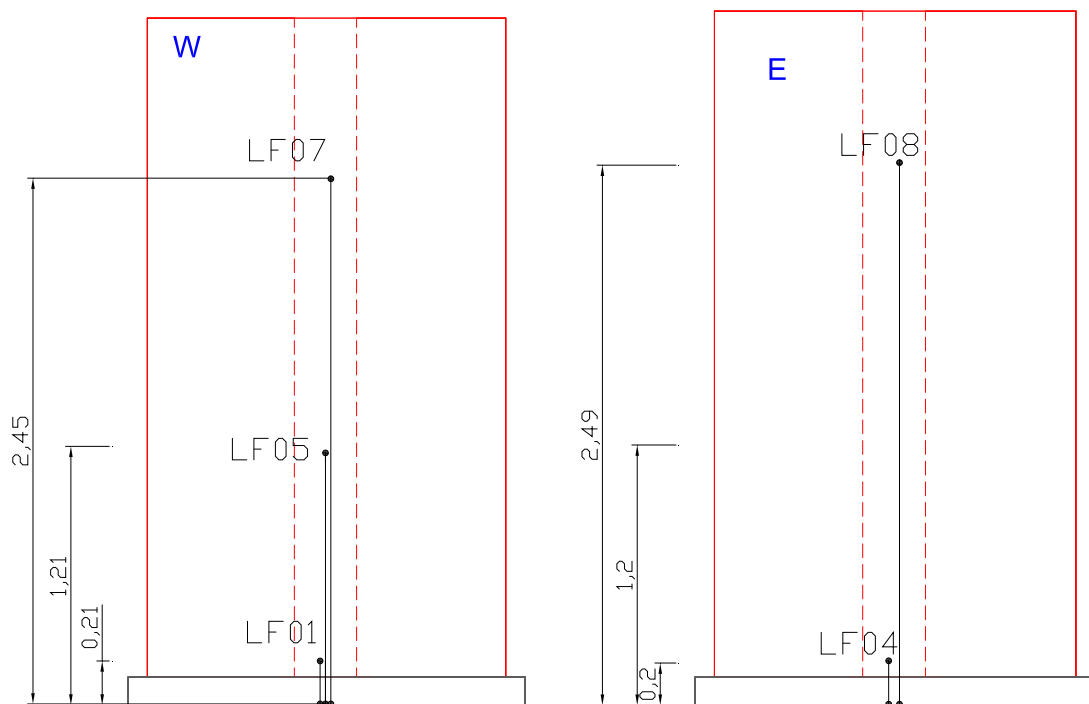


Figura 36 – Transdutores de deslocamentos verticais.

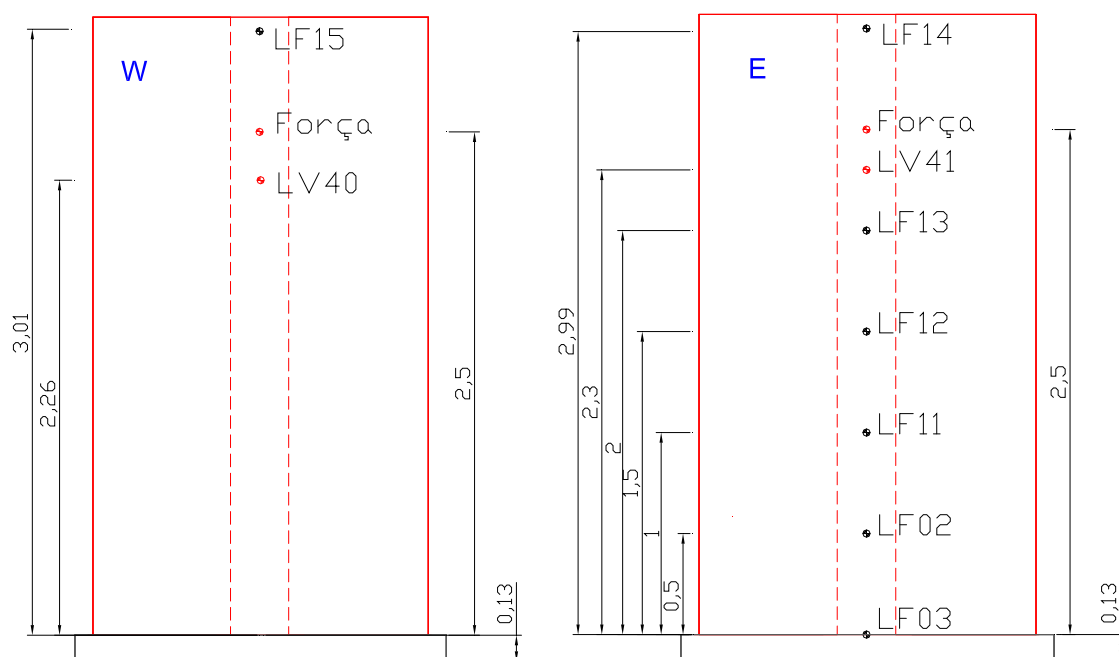


Figura 37 – Transdutores de deslocamentos horizontais.

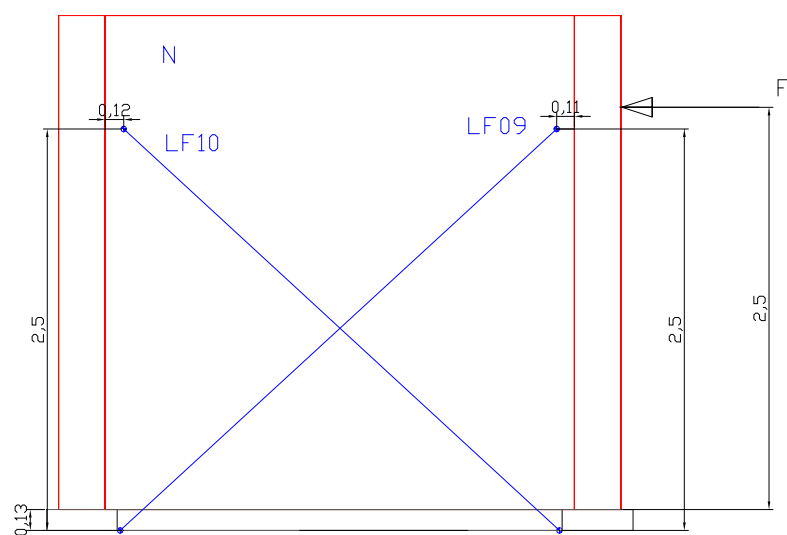


Figura 38 – Transdutores de deslocamentos oblíquos na face norte.

### 5.3 Ensaaios cíclicos

Para a realização destes ensaios, tal como nos anteriores, foi colocada uma carga vertical no topo da parede de 20kN para simular as sobrecargas existentes nas construções e as acções permanentes, nomeadamente o peso de uma cobertura de madeira.

O ensaio da parede no seu estado original foi controlado em termos de força. Já o ensaio realizado após o seu reforço foi controlado em termos de deslocamentos, sendo, desta forma, mais fácil controlar a acção sobre a parede e perceber mais facilmente a evolução dos danos. Os ciclos de deslocamentos impostos com os respectivos drifts foram os indicados na Tabela 16.

Tabela 16 – Ciclos de deslocamentos impostos à parede.

Deslocamentos impostos (mm) / Drift (%)								
0.125 (0.005%)	0.25 (0.01%)	0.50 (0.02%)	1.25 (0.05%)	2.50 (0.1%)	5.00 (0.2%)	12.50 (0.5%)	25.00 (1.0%)	37.50 (1.5%)

As forças horizontais aplicadas no plano da parede foram impostas em ciclos sucessivos de amplitude crescente, com carga e descarga, repetindo-se o mesmo processo em sentido oposto. Cada ciclo, corresponde a uma aplicação com a mesma intensidade da força repetida em três vezes. Nos gráficos seguintes (Figuras 39 e 40) observa-se, de uma forma geral, a evolução das forças e deslocamentos impostos à parede.



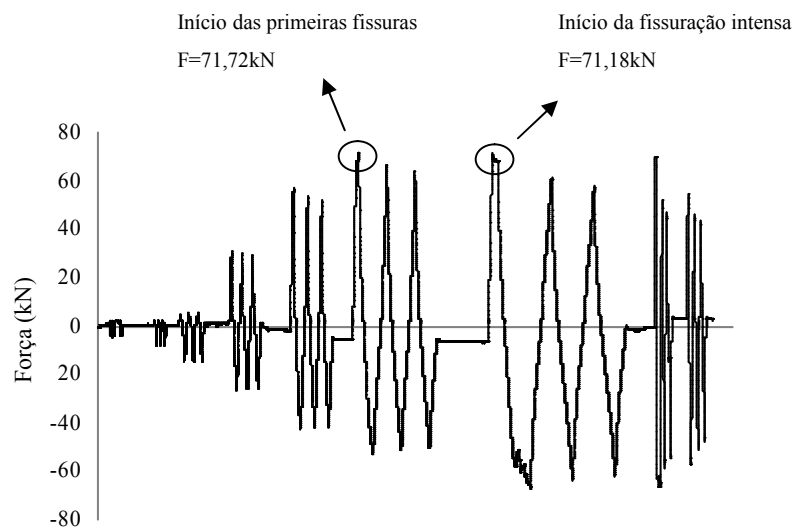


Figura 39 – Evolução da força ao longo do ensaio.

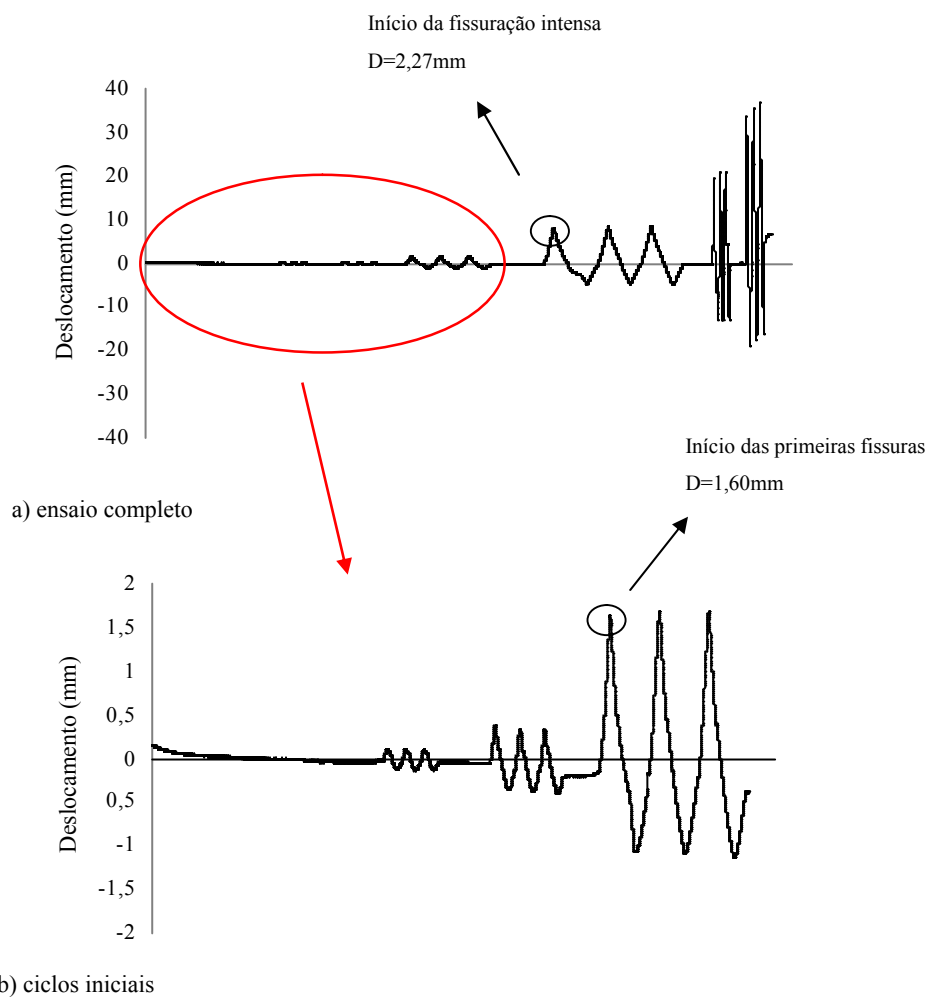


Figura 40 – Evolução do deslocamento no ponto de aplicação da força ao longo do ensaio.

De acordo com os gráficos da evolução da força e do deslocamento imposto ao longo do ensaio, verifica-se que entre os vários ciclos impostos à parede ocorriam intervalos de tempo em que a força e o deslocamento eram nulos. Estes intervalos correspondem a paragens de aplicação de carga para se efectuar a leitura das frequências naturais da parede e para uma sondagem dos danos causados em profundidade através de georadar. O varrimento efectuado na parede por georadar, não se encontra descrito nesta dissertação por ser uma técnica que se apresenta fora do âmbito do estudo desenvolvido.

Com o decorrer dos deslocamentos impostos à parede, foi-se verificando uma evolução crescente dos danos, através da propagação de pequenas fissuras até ao destacamento localizado do reboco (Figuras 41, 42 e 43). A fendilhação formada ao longo da parede nas faces Sul e Norte começou por se propagar de Oeste para Este, através de pequenas fissuras que se foram evidenciando no decorrer do ensaio, até formarem um X bem definido. A fissuração só se tornou perceptível a partir de um deslocamento ao nível da força, correspondente ao ciclo de 5mm. Após esta fase de ciclos, as fissuras que se visualizavam eram maioritariamente da espessura de um fio de cabelo. No deslocamento seguinte, de 12.5mm, ocorreu uma acentuação e propagação intensa das fissuras existentes. Verificou-se, ainda, a formação de muitas novas fissuras com aberturas na ordem dos 0.5 e 1mm, ao longo de todas as faces da parede (Figuras 41 e 42). No prosseguimento do ensaio, para deslocamentos de 25 e 37.5mm, verificou-se um destacamento acentuado de reboco em grande parte das zonas já fissuradas. Foi também visível um esmagamento da parede na zona envolvente da ligação da força à parede. Através do esquema presente na Figura 43, observa-se o reboco caído durante os últimos ciclos de deslocamentos impostos e as fissuras formadas ao nível das juntas de argamassa e dos blocos. De uma análise, mais cuidada junto à parede, foi perceptível que essas fissuras ocorreram preferencialmente nas juntas de ligação da argamassa e blocos, encontrando-se alguns blocos partidos. Essas roturas ocorreram principalmente nos seus cantos, no seguimento da orientação da propagação das fissuras. Apesar do ensaio ter-se dado como concluído no ciclo de deslocamentos de 37.5mm, de forma preventiva a fim de evitar-se o desmoronamento local de alguns blocos de adobe, que poderiam provocar danos ao nível do equipamento instalado, previa-se que a parede aguentaria um nível de deslocamentos superior, pois não foi visível nenhum rompimento das fibras da rede.

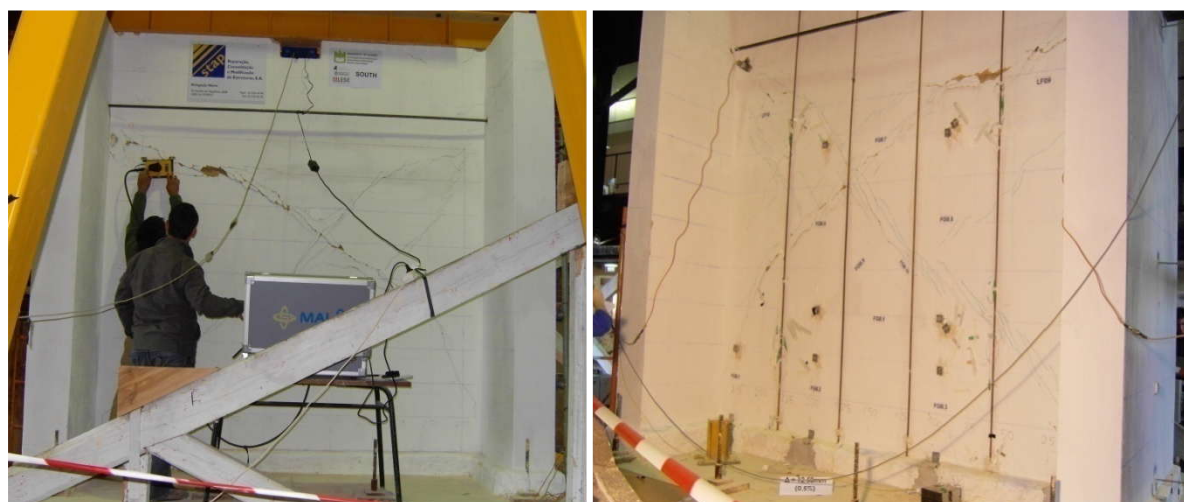
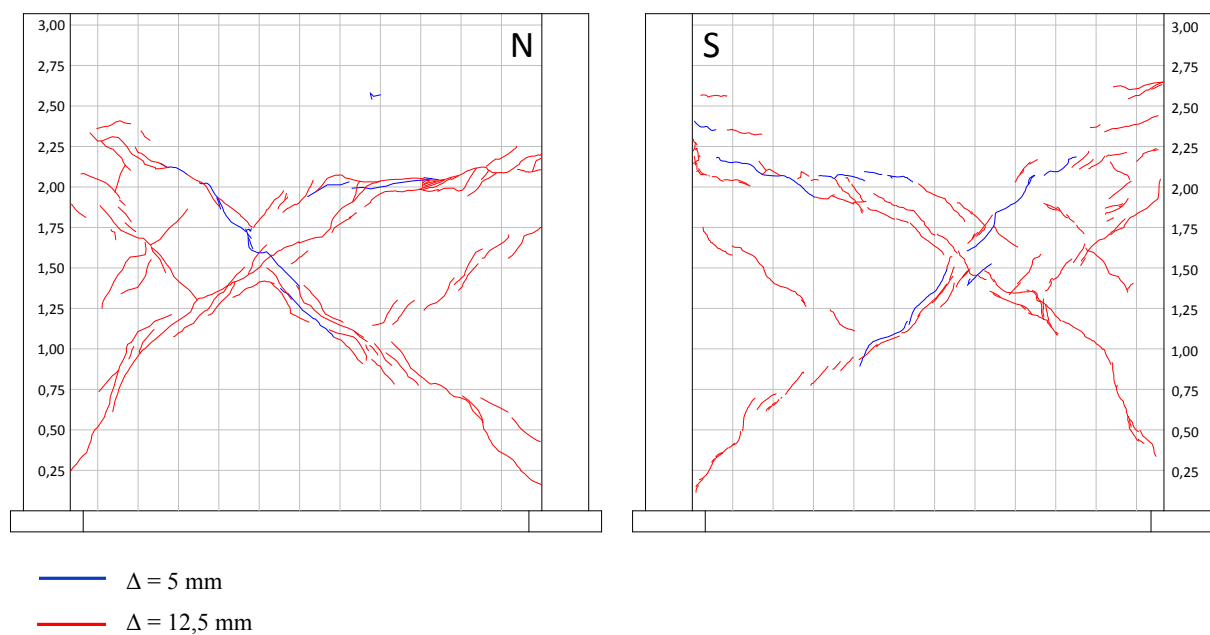


Figura 41 – Evolução da fissuração nas faces Norte e Sul.

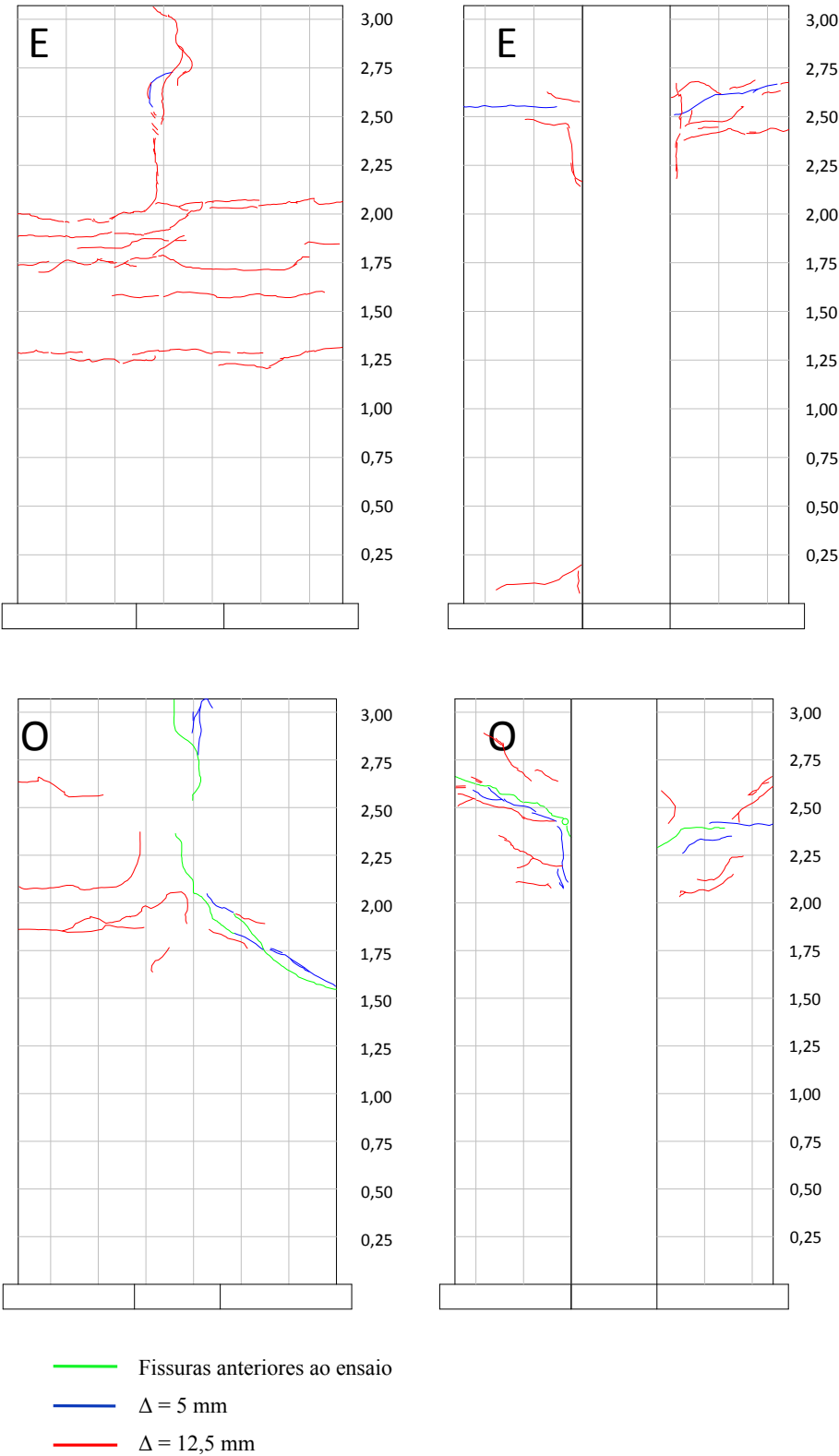


Figura 42 – Evolução da fissuração nas faces Oeste e Este.

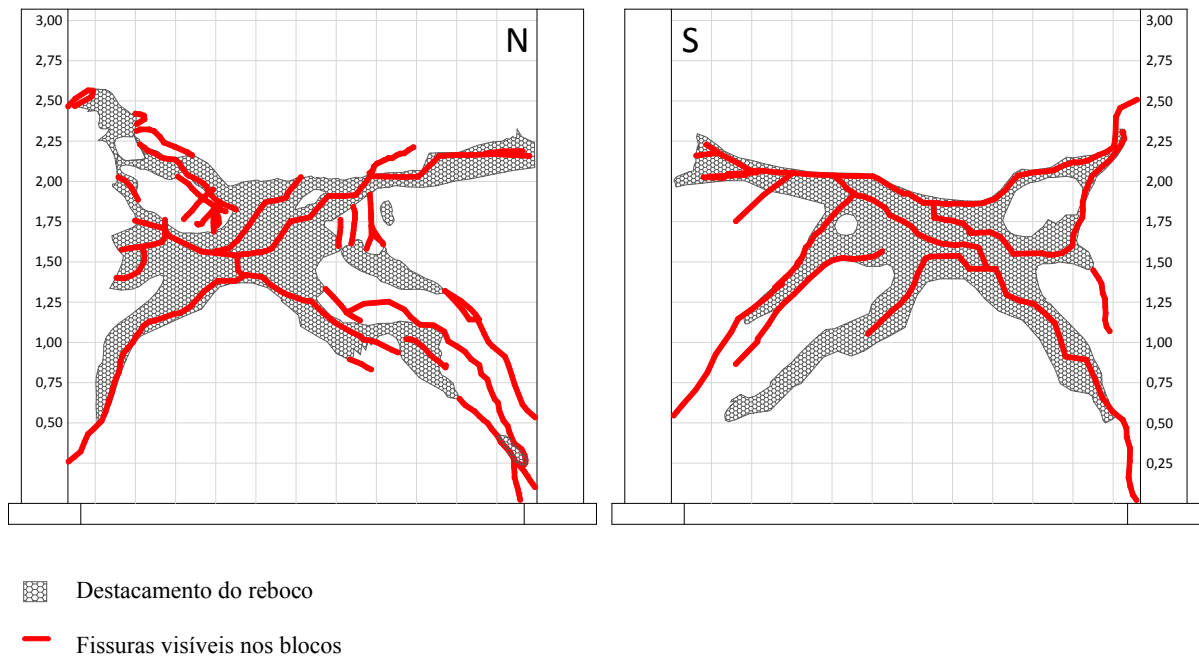


Figura 43 – Danos finais visíveis nas faces Norte e Sul.

Da Figura 44, analisa-se, de uma forma geral a evolução dos ciclos carga-descarga nos dois sentidos, impostos à parede no decorrer do ensaio.

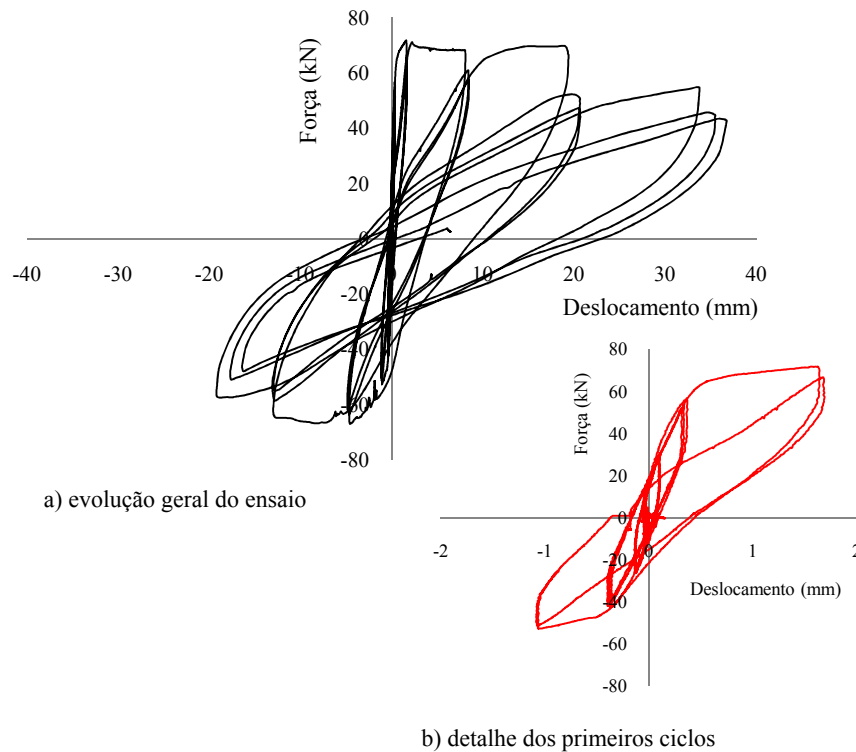


Figura 44 – Força *versus* deslocamento ao nível do ponto de aplicação da força (LV 41).

Da análise dos resultados obtidos da evolução da força com o deslocamento imposto, podem-se retirar as seguintes conclusões gerais do ensaio cíclico:

- O deslocamento máximo imposto no topo da parede foi de 41.49mm, sendo ao nível do ponto de aplicação da força de 36.71mm;
- O início da fissuração ocorreu para uma força de 71.72kN e para um deslocamento correspondente de 1.60mm ao nível do ponto de aplicação da força (2.50m);
- A propagação e a abertura de novas fissuras, verificou-se de uma forma intensa para uma força aplicada de 71.28kN e um correspondente deslocamento de 2.27mm;
- A capacidade resistente da parede ao corte foi de 71.75kN;
- A resistência residual da parede observou-se para uma força de 43.47kN, valor correspondente a um decréscimo de 20% da sua resistência máxima.

A partir da Figura 44, por integração da curva força *versus* deslocamento, produziu-se, o gráfico correspondente à energia dissipada durante o ensaio (Figura 45).

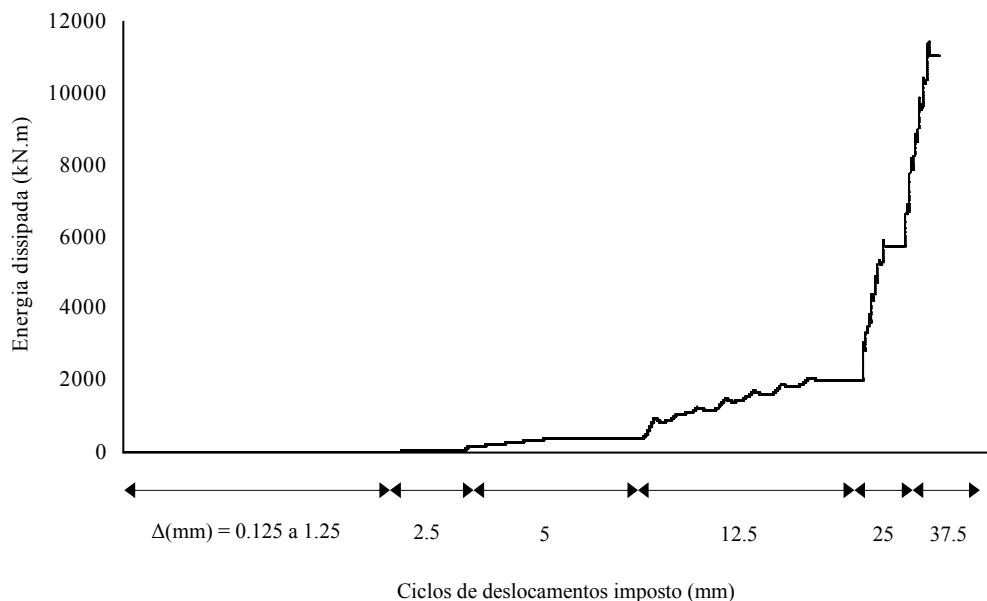


Figura 45 – Evolução da energia total ao longo do ensaio.

Da análise ao gráfico da Figura 45, observam-se três patamares distintos de dissipação de energia:

- Do início, até ao ciclo de deslocamento imposto de 2.5mm verifica-se que a dissipação de energia foi praticamente nula, o que corresponde aos primeiros ciclos do ensaio em que não se verificaram danos na parede. Analisando-se o gráfico força *versus* deslocamento confirma-se o referido, através de uma resposta praticamente linear da parede nos primeiros ciclos de deslocamentos impostos;
- Entre os ciclos de 2.5mm e 25mm observa-se uma dissipação de energia de cerca de 1/3 da energia total dissipada. Esta dissipação indica o início dos danos causados na parede;
- Nos dois últimos ciclos impostos, através da energia dissipada verifica-se que ocorreu uma propagação intensa dos danos por toda a parede. Estima-se que 2/3 da energia total seja dissipada nestes ciclos.

Efectuou-se uma análise dos ensaios realizados na parede, com reforço e no seu estado original. Esta análise permitiu a obtenção de dados comparativos (Figura 46) que permitiram retirar conclusões sobre a eficiência do reforço efectuado.

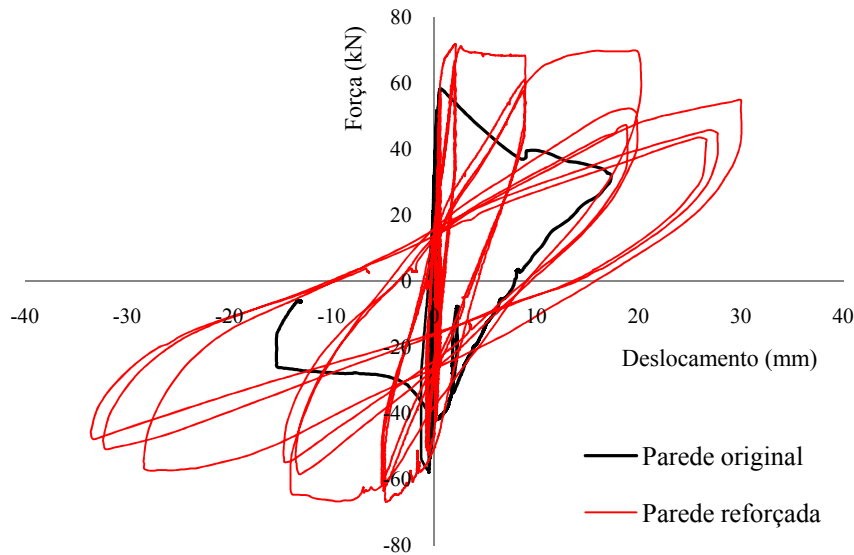


Figura 46 – Força *versus* deslocamento no topo da parede (LF 15) com e sem reforço.

Dos resultados apurados nos dois ensaios conclui-se que:

- A rigidez inicial da parede após o seu reforço foi praticamente igual à rigidez da parede original;
- A capacidade máxima resistente da parede ao corte teve um incremento de 25% após o reforço;
- O deslocamento máximo imposto no topo da parede teve um aumento de 200%;
- A fragilidade da parede, pós pico de força diminuiu, aumentando assim a sua ductilidade e capacidade de dissipação de energia;
- Para ciclos repetidos observa-se uma menor degradação de resistência na parede reforçada.



## 5.4 Ensaios dinâmicos

Os ensaios dinâmicos foram realizados através de um sismógrafo colocado numa abertura existente no topo da parede. Efectuaram-se várias leituras das frequências próprias da parede antes, durante e após o ensaio (Figura 47).

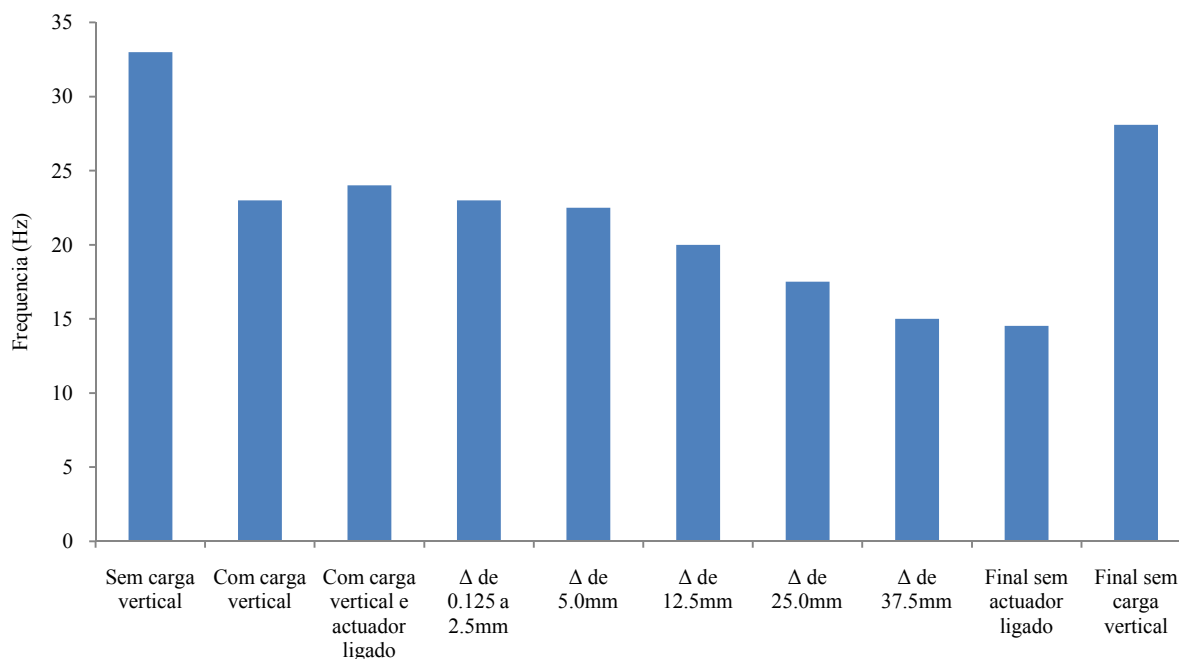


Figura 47 – Evolução das frequências próprias (Hz) da parede.

Da análise geral às frequências obtidas no prolongamento do ensaio observa-se que:

- A frequência natural da parede foi de 33Hz e com uma carga vertical de 20kN baixou para 23Hz;
- O actuador hidráulico ligado à parede tornou-a numa estrutura mais rígida, aumentando assim a sua frequência;
- Até um deslocamento de 5mm ao nível do ponto de aplicação da força a frequência se manteve inalterada, o que indica a ausência de danos;
- Após a sequência de ciclos correspondentes ao deslocamento de 5mm, o valor da frequência foi diminuindo com evolução do ensaio cíclico, devido à propagação de danos por toda a parede;

- Da diferença entre as frequências medidas antes e após o ensaio, se verifica que os danos impostos na parede corresponderam a um decréscimo de 15% na sua frequência.

Da análise comparativa, entre as frequências obtidas nos dois ensaios (Figura 48), denota-se a diferença de comportamento mostrado pela parede durante a aplicação da força.

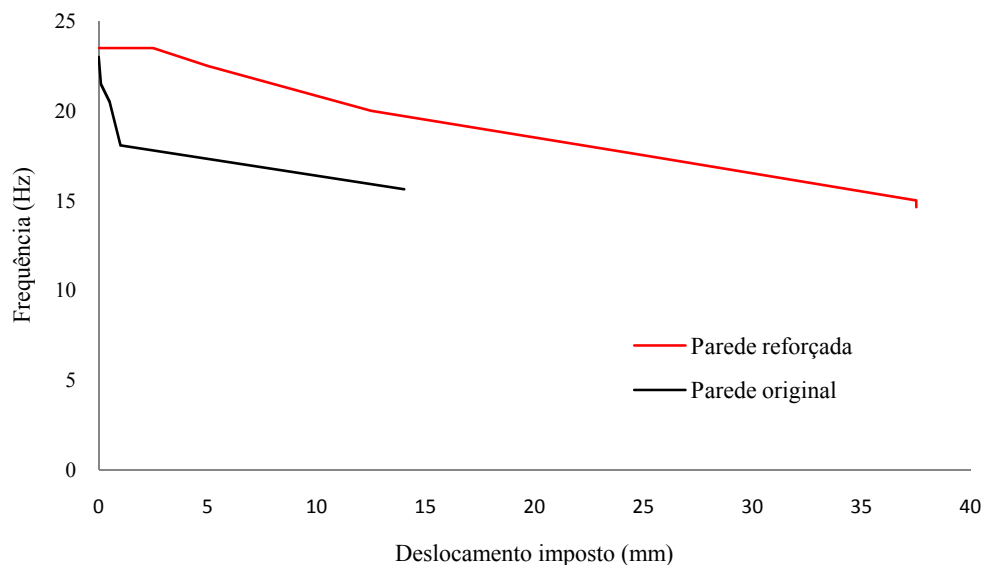


Figura 48 – Evolução da 1ª frequência da parede reforçada *versus* parede original com força vertical.

Com uma frequência própria de 23Hz após a aplicação da carga vertical, verificou-se que a reparação e o reforço da parede lhe conferiram uma rigidez praticamente igual à original, dado que a primeira frequência obtida no ensaio realizado anteriormente foi de 22.95Hz. Durante os vários ciclos de deslocamentos impostos à parede reforçada, observou-se que a frequência sofreu um decréscimo mais suave (Figura 48), permitindo afirmar que esta mantém, por mais tempo de aplicação de carga, uma menor perda das suas características. Este comportamento é traduzido pela influência que o reforço repercutiu na parede.

## 5.5 Ensaios de flexão e compressão da argamassa de construção

Após a segunda fase de ensaios efectuados na parede, testaram-se os provetes produzidos durante as intervenções de reparação e reforço, obtendo-se, os valores resistentes das tensões de rotura apresentados nas Tabelas 17 e 18.

Tabela 17 – Tensão resistente dos provetes de selagem das fissuras.

Proвете	Tensão de rotura em flexão (MPa)	Tensão de rotura em compressão (MPa)		
		P-1	P-2	Média
1	1.43	4.97	5.21	5.09
2	1.21	4.34	4.58	4.46
3	1.41	2.92	4.53	3.73
4	0.80	4.75	5.37	5.06
5	0.90	5.19	4.50	4.85
6	*	4.33	4.72	4.53
7	*	2.51	2.12	2.32
8	*	2.65	3.81	3.23
9	*	*	*	*
10	0.99	2.88	2.32	2.60
11	1.18	3.38	3.82	3.60
12	*	1.92	2.02	1.97
Média	<b>1.13</b>			<b>3.77</b>
Mínimo	0.80			1.97
Máximo	1.43			5.09
Desvio padrão	0.24			1.13

(\*) os provetes foram danificados por retracção ou manuseamento

Dos resultados observa-se uma maior dispersão em termos de tensões de rotura em compressão. Verifica-se também, que a tensão de rotura em flexão corresponde a 30% da tensão de rotura em compressão.

Tabela 18 – Tensão resistente dos provetes de argamassa de reboco da parede.

Provete	Tensão de rotura em flexão (MPa)	Tensão de rotura em compressão (MPa)		
		P-1	P-2	Média
1	0.26	0.44	0.63	0.53
2	0.14	0.64	0.65	0.64
3	0.22	0.63	0.56	0.60
4	0.15	0.60	0.65	0.62
5	0.19	0.57	0.49	0.53
6	0.17	0.52	0.54	0.53
7	0.22	0.58	0.57	0.58
8	0.09	0.64	0.54	0.59
9	(*)	0.70	0.65	0.68
10	0.30	0.74	0.76	0.75
11	(*)	0.51	0.59	0.55
12	0.23	0.72	0.70	0.71
Média	<b>0.20</b>			<b>0.61</b>
Mínimo	0.09			0.53
Máximo	0.30			0.75
Desvio padrão	0.06			0.07

(\*) os provetes foram danificados por retracção ou manuseamento

Da análise a Tabela 18 verifica-se que a resistência da tensão de rotura em flexão é 33% da correspondente resistência em compressão. Em comparação com os valores obtidos dos provetes de construção (ver ponto 3.4.3), observa-se que a argamassa usada no reforço da parede contém as mesmas características que a argamassa usada na sua construção.

Com um desvio padrão tão baixo, pode-se afirmar que a argamassa produzida apresenta um comportamento em termos de resistências em compressão e tracção bastante homogéneo.

Em termos gerais apreendeu-se que a resistência de tensão de rotura em flexão é cerca de 30% da resistência de rotura em compressão para as argamassas produzidas. Constatou-se também que o peso volúmico médio para as argamassas produzidas foi de  $18\text{kN/m}^3$ .

## **CAPÍTULO 6 – Conclusões e desenvolvimentos futuros**

O comportamento frágil que se tem verificado para as estruturas de alvenaria de adobe é uma problemática corrente das construções existentes face à acção sísmica. Neste sentido e no âmbito do trabalho desenvolvido nesta dissertação, mostram-se algumas conclusões gerais do comportamento destas estruturas na presença de esforços horizontais no plano.

### **6.1 Conclusões gerais**

Como a parede testada foi construída com blocos provenientes de uma demolição, com uma argamassa representativa da utilizada nestes materiais, com dimensões à escala real e com uma carga vertical uniformemente distribuída no seu topo de forma a simular o peso das sobrecargas e das acções permanentes das estruturas, nomeadamente coberturas de madeira, os resultados obtidos poderão ser alargados às construções existentes no património nacional.

Deste modo, o trabalho realizado permitiu descrever algumas características e aumentar o nível de conhecimentos sobre o comportamento de estruturas em alvenaria de adobe, quando sujeitas a cargas horizontais. Foi possível caracterizar os níveis máximos de deformação admissível e os modos de rotura correspondentes para a parede de alvenaria de adobe estudada. Definido o comportamento nesta parede, estudou-se uma solução de reforço que melhorasse as suas características na presença de esforços cíclicos horizontais.

Das soluções de reparação e reforço aplicadas na parede, constatou-se uma recuperação da rigidez, um pequeno acréscimo de resistência, um grande aumento da

ductilidade e da capacidade de dissipação de energia e a ausência de um modo de rotura frágil característico para este tipo de alvenarias. Com o melhoramento obtido nas suas características, diminuiu-se a sua vulnerabilidade face à presença de um sismo.

A comparação dos resultados obtidos pelos ensaios da parede, no seu estado original e após o reforço, possibilitam o estabelecimento de uma base de conhecimentos que permite a interpretação de patologias estruturais, a calibração de modelos numéricos com vista a uma melhor descrição do comportamento das construções e a avaliação da segurança em alvenarias de adobe.

Do modelo estudado, verificou-se que a execução dos trabalhos em laboratório permitiu um maior controlo nos materiais e técnicas utilizadas, nas fases de construção e reforço e nos ensaios realizados.

Do estudo que se efectuou aos materiais existentes no mercado, compatíveis na sua impregnação com este tipo de estruturas, verificou-se que existem boas soluções a preços que não conduzem a um aumento substancial do custo total da obra.

A goma usada na reparação das fissuras mostrou-se como uma solução de elevada eficiência, no sentido que contribuiu para a recuperação da rigidez inicial da parede após os danos causados pelo primeiro ensaio. Esta solução poderá facilmente ser impregnada na reabilitação de estruturas já existentes.

A rede Cintoflex utilizada no reforço da parede conferiu-lhe uma diminuição da sua fragilidade pós pico de força e proporcionou um aumento da ductilidade.

## **6.2 Possíveis linhas de desenvolvimento futuro**

Acerca do prosseguimento de estudos, com base nos óptimos resultados obtidos com a solução de reforço, apontam-se os seguintes trabalhos a desenvolver:

- Estudo do comportamento de paredes de alvenaria de adobe reforçadas com malhas geossintéticas, quando sujeitas a esforços horizontais fora do plano;

- Construção de uma parede com descontinuidades ao longo do seu vão (portas e janelas), submetendo-a aos mesmos ensaios descritos nesta dissertação de forma a obter-se mais informações dos reais modelos existente nas construções;
- Desenvolvimento de modelos numéricos que representem o real comportamento estrutural, permitindo avaliar a segurança das estruturas existentes e o dimensionamento de estruturas com reforço;
- Construção de uma vivenda em adobe à escala reduzida de dois pisos, com soalho e cobertura de madeira em laboratório, e submetê-la a esforços cíclicos horizontais, de forma a alargar o conhecimento existente relativo ao comportamento destas estruturas face à presença de um sismo;
- Alargar a campanha de ensaios experimentais a outros materiais com diferentes composições em terra, de forma a proporcionar-se um conhecimento mais abrangente para alvenarias em terra.

## Bibliografia

### A

Arêde, A.; Costa, A.; Varum, H.; Vicente, R.; Costa, A.; Pereira, H.; Rodrigues, H. “Avaliação experimental do comportamento fora do plano de paredes de alvenaria de adobe”. V Seminário Arquitectura de Terra em Portugal, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal, 10-13 de Outubro de 2007.

### B

Brito, J.; Gomes, M. I. “Sismo-Reforço de Construções de Terra Crua”. Terra em Seminário – IV Seminário Ibero-Americano de Construção com Terra e III Seminário Arquitectura de Terra em Portugal, 1ª ed. Lisboa. Argumentum , ISBN 972-8479-37-9. 2005.

Blondet, M.; Torrealva, D.; García, G.; Ginocchio, F.; Madueño, I. “Using Industrial Materials for the Construction of Safe Adobe Houses in Seismic Areas”. PUCP, Peru, 2004.

### C

Corazao, M.; Blondet, M. “Estúdio experimental del comportamiento estructural de las construcciones de adobe frente a sollicitaciones sísmicas”. Banco Peruano de los Constuctores. Lima, Peru, 1974.

### D

Dowling, D.; Samali, B.; Li, J. “ An improver means of reinforcing adobe walls – external vertical reinforcement”. University of Technology. Sydney, Australia, 2005.

### F

Fernandes, M. Mecânica dos solos. Vol I: “Conceitos e princípios fundamentais”, FEUP Edições, Porto, 2006.

Figueiredo, D.; Casbur, M. “Projeto Piloto. Construção de Casa de Terra Crua”. Ouro Preto – Minas Gerais, TerraBrasil, 4 a 8 de Novembro de 2006.



## **H**

Houben, H.; Guillaud, H. “Earth Construction – a Comprehensive guide, CRATerre – EAG”. Intermediate Technology Publications, London, 1994.

## **J**

Jorge, F. “Terra em Seminário – IV Seminário Ibero-Americano de Construção com Terra e III Seminário Architectura de Terra em Portugal”. 1ª ed. Lisboa, Argumentum, ISBN 972-8479-37. 2005.

## **L**

LOPES, M.L. “Aplicação de geossintéticos em engenharia civil”, Texto de apoio à disciplina com o mesmo título, FEUP, 1993.

Lopes, M. “Estudo de coeficientes de segurança a aplicar a estruturas de controlo de erosão e de estabilização de maciços com geossintéticos”, Dissertação de Doutoramento em Engenharia Civil na FEUP, Porto, 2005.

## **M**

Memari, A.; Kauffman, A. “Review of Existing Seismic Retrofit Methodologies for Adobe Dwellings and Introduction of a New Concept”. Seminario Internacional – SismoAdobe2005, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Peru, 16 a 19 de Maio, 2005.

Manso, A. C.; Fonseca, M. S.; Espada, J. C.; “Informações sobre custos – Fichas de rendimentos”, Lisboa, LNEC, 2004, vol. I e II.

## **N**

Newhouse, E. L. “The Builders, The National Geographic Society”. Washington, D.C., 1992.

## **P**

Pereira, H. “Caracterização do comportamento estrutural de construções em adobe”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil no Departamento de Eng. Civil da Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal, 2008.

**R**

“Reglamento Nacional de Construcciones”. Norma Técnica de Edificación NTE E.080. Lima, Peru, 2000.

**T**

Torrealva, D e Vargas, J. “Refuerzo sísmico de vivienda de adobe con malla exterior compatible”. Seminario Internacional de Arquitectura, Construcción y Conservación de Edificaciones en Tierra en Áreas Sísmicas, SismoAdobe2005, PUCP, Lima, Perú, 2005.

Torrealva, D e Acero, J. “ Reinforcing adobe buildings with exterior compatible mesh. The final solution against the seismic vulnerability” Universidad Católica del Perú, Perú, 2006.

Tolles, E.; Leroy.; William, S.; Ginell. Getty seismic adobe project (GSAP): “Analysis of the results of shaking table tests on large scale model adobe structures”. Report, Getty Conservation Institute, Los Angeles, 2000.

Tolles, E.; Leroy.; Edna.; Kimbro.; Charles, C.; Thiel Jr.; Frederick. A.; Webster. and William,. S.; Ginell. GSAP—Getty Conservation Institute guidelines for seismic strengthening of adobe project: Report of second year activities. Report, Getty Conservation Institute, Marina del Rey, Calif., October 31, 1993.

Tolles, E.; Leroy, and Helmut Krawinkler. “Seismic studies on smallscale models of adobe houses”. Ph.D. diss., John A. Blume Earthquake Engineering Center, Department of Civil Engineering, Stanford University, Palo Alto, Calif. 1989.

**U**

Useche, I. “Experiencia Construtiva, Bloque de Tierra Compactada (BTC) Y Estabilizados com Cemento”. Universidad Nacional Experimental del Táchira, Decanato de Investigación Edificio B Sector Paramillo – San Cristóbal – Estado Táchira, Venezuela, 2006.

**V**

Veiga Oliveira, E.; Galhano, F. “Arquitectura Tradicional Portuguesa”. Portugal de Perto Publicações D. Quixote. Portugal. 1992.

Varum, H.; Martins, T.; Velosa, A. “Caracterização do adobe em construções existentes na região de Aveiro”. IV SIACOT Seminário Ibero-Americano de Construção com terra e III Seminário Arquitectura de Terra em Portugal. Convento da Orada. Monsaraz, 8 a 10 de Outubro de 2005.

Varum, H.; Costa, A.; Pereira, H.; Almeida, J. “Comportamento estrutural de elementos resistentes em alvenaria de adobe”. Terra Brasil. Minas Gerais. Ouro Preto, 4 a 8 de Novembro de 2006.

Varum, H.; Costa, A.; Velosa, A.; Martins, T.; Pereira, H.; Almeida, J. “Caracterização mecânica e patológica das construções em Adobe no distrito de Aveiro com suporte em intervenções de reabilitação”. Terra Brasil. Minas Gerais, Ouro Preto, 4 a 8 de Novembro de 2006. Education and Culture Program. Convento da Orada, Monsaraz, Portugal 23-25 de Novembro de 2005.

Varum, H.; Costa, A.; Pereira, H.; Almeida, J.; Rodrigues, H. “Avaliação Experimental do Comportamento Estrutural de Elementos Resistentes em Alvenaria de Adobe”. Departamento de Eng. Civil. Universidade de Aveiro. Portugal. 2006.

Vargas J., Bariola J. e Blondet M. “Resistencia sísmica de la Mampostería de Adobe”, Universidade Católica do Peru, Lima, Peru, 1984.

## **Z**

Zavala, C.; Igarashi, L. “Propuesta de Reforzamiento para Muros de Adobe”. Universidad Nacional de Ingeniería – Facultad de Ingeniería Civil. CISMID, Perú, 2006.

Zegarra, L.; Quiun, D.; San Bartolomé, A.; Giesecke, A. “Reforzamiento de viviendas de adobe existentes. 2da. Parte: Ensayos sísmicos de módulos” Colegio de Ingenieros del Perú, Ponencias, XI Congreso Nacional de Ingeniería Civil, Trujillo, Perú, noviembre, Artículo No. E-36 y E-37. 1997.

Zegarra, L.; Quiun, D.; San Bartolomé, A.; Giesecke, A. “Reforzamiento de viviendas de adobe existentes. 1ra. Parte: Ensayos sísmicos de muros U”. Colegio de Ingenieros del Perú, Ponencias, XI Congreso Nacional de Ingeniería Civil, Trujillo, Perú, noviembre, Artículo No. E-36 y E-37. 1997.